



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
UNIVERSITY OF BANJA LUKA

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING



АНАЛИЗА КВАЛИТЕТА АУДИО СИГНАЛА У КОМУНИКАЦИЈИ ПУТЕМ ВИДЉИВЕ СВЈЕТЛОСТИ

МАСТЕР РАД

Ментор:

Доц. др Јован Галић

Кандидат:

Милан Млађен, дипл. инж.

Бања Лука, децембар 2023. године



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ



АНАЛИЗА КВАЛИТЕТА АУДИО СИГНАЛА У КОМУНИКАЦИЈИ ПУТЕМ ВИДЉИВЕ СВЈЕТЛОСТИ

МАСТЕР РАД

Ментор:

Доц. др Јован Галић

Кандидат:

Милан Млађен, дипл. инж.

Бања Лука, децембар 2023. године



UNIVERSITY OF BANJA LUKA
FACULTY OF ELECTRICAL
ENGINEERING



AN ANALYSIS OF AUDIO QUALITY IN VISIBLE LIGHT COMMUNICATION

MASTER'S THESIS

Mentor:

Asst. Prof. Dr Jovan Galić

Candidate:

Milan Mladen, B.Sc.

Banja Luka, December 2023

ИНФОРМАЦИЈЕ О МЕНТОРУ И МАСТЕР РАДУ

Ментор:

Др Јован Галић, доцент на Електротехничком факултету Универзитета у Бањој Луци

Наслов мастер рада:

Анализа квалитета аудио сигнала у комуникацији путем видљиве свјетлости

Резиме:

У савременим комуникационим системима, константно повећање количине саобраћаја у радиофреквенцијском (RF) спектру за последицу има потражњу за другим фреквенцијским опсезима који ће обезбиједити бржи, поузданији и ефикаснији пренос података. Једно од потенцијалних рјешења јесте опсег видљиве свјетлости. У све ширем спектру примјена комуникације путем видљиве свјетлости (VLC), своје мјесто проналази и пренос аудио сигнала. Управо је у овом истраживању, како у симулацији, тако и у реалном окружењу кориштењем OpenVLC платформе, демонстриран пренос аудио сигнала у моделованом VLC систему, те је на пријему извршена процјена његовог квалитета. У симулацији је анализиран и допринос заштитног кодовања на квалитет примљеног аудио сигнала. За процјену квалитета се, поред традиционалних објективних параметара као што су THD, SMPTE IMD, SNR и SINAD, користе и објективне методе које моделују психоакустичке карактеристике људског слушног система, попут PEAQ, PESQ и ViSQOL. Како је у модерним мултимедијалним системима од велике важности обезбиједити што је могуће бољи квалитет аудио сигнала крајњем кориснику, добијени резултати показују да је пренос аудио сигнала преко VLC у те сврхе оправдан, с обзиром на то да се у пажљиво моделованом VLC систему може постићи задовољавајућ квалитет аудио сигнала на пријему.

Кључне ријечи:

процјена квалитета аудио сигнала, VLC, заштитно кодовање, PEAQ, PESQ, ViSQOL, THD, SMPTE IMD, SNR, SINAD

Научна област:

Инжењерство и технологија

Научно поље:

Електротехника, електроника и информационо инжењерство

Класификациона ознака:

T 180 – Телекомуникациони инжењеринг

Тип одабране лиценце Креативне заједнице:

Ауторство – некомерцијално – дијелити под истим условима (CC BY-NC-SA)

Комисија:

Др Гордана Гардашевић, редовни професор, предсједник

Др Јован Галић, доцент, ментор

Др Славко Шајић, ванредни професор, члан

INFORMATION ABOUT MENTOR AND MASTER'S THESIS

Mentor:

Dr Jovan Galić, Assistant Professor at the Faculty of Electrical Engineering, University of Banja Luka

The title of the master's thesis:

An Analysis of Audio Quality in Visible Light Communication

Abstract:

In modern communication systems, the constant increase in the amount of traffic in the radio frequency (RF) spectrum results in the search for other frequency ranges that will provide faster, more reliable, and more efficient data transmission. One of the potential solutions is the range of visible light. In the ever-expanding range of applications of Visible Light Communication (VLC), the transmission of audio signals also finds its place. In this research, both in simulation and in a realistic environment using the OpenVLC platform, the audio signal transmission in the modeled VLC system is demonstrated, and its quality is assessed at the reception. The simulation also analyzes the contribution of channel coding to the quality of the received audio signal. For quality assessment, in addition to traditional objective parameters such as THD, SMPTE IMD, SNR, and SINAD, objective methods that model the psychoacoustic characteristics of the human auditory system, such as PEAQ, PESQ, and ViSQOL, are also used. As in modern multimedia systems, it is of great importance to provide the best possible audio signal quality to the end user; the obtained results show that the transmission of audio signals via VLC is justified for these purposes, given that in a carefully modeled VLC system, satisfactory audio signal quality can be achieved on reception.

Keywords:

Audio quality assessment, VLC, channel coding, PEAQ, PESQ, ViSQOL, THD, SMPTE IMD, SNR, SINAD

Scientific area:

Engineering and technology

Scientific field:

Electrical engineering, electronics and information engineering

Classification code:

T 180 – Telecommunications engineering

Type of selected Creative Community license:

Authorship – NonCommercial – ShareAlike (CC BY-NC-SA)

Evaluation Committee:

Dr Gordana Gardašević, Full Professor, Chairperson

Dr Jovan Galić, Assistant Professor, Mentor

Dr Slavko Šajić, Associate Professor, Member

ПОСВЕТА

*Овај мастер рад посвећујем својој мајци Милки, као и Добринки и Весни,
те искреним пријатељима Нини, Маји, Тамари, Кристини и Желимиру
према којима осјећам велику љубав и захвалност за сву подршку и разумијевање.*

Садржај

1. Увод	1
2. Комуникација путем видљиве свјетлости.....	3
2.1 Оптичке бежичне комуникације	3
2.1.1 Историјски развој OWC технологије.....	5
2.1.2 Стандардизација OWC технологије.....	7
2.1.2.1 IrDA стандардизација	7
2.1.2.2 IEEE стандардизација.....	10
2.2 Упоредна анализа RF и VLC технологија	13
2.3 LED као предајник у VLC систему.....	16
2.4 VLC систем	20
2.5 Класе и архитектура VLC уређаја	23
2.5.1 Физички слој	24
2.5.1.1 Модулациони поступци	27
2.5.1.2 Заштитно кодовање	31
2.5.1.3 Техника затамњивања свјетлости	33
2.5.2 MAC слој	34
2.6 Изазови и ограничења у примјенама VLC технологије.....	38
2.6.1 Поједини сценарији примјене VLC технологије	41
3. Методе процјене квалитета аудио сигнала	44
3.1 MOS	47
3.2 PEAQ	49
3.3 PESQ	52
3.4 POLQA.....	54
3.5 ViSQOL.....	54
4. Експериментална поставка и анализа перформанси у симулацији.....	56
4.1 Процјена квалитета говорног сигнала.....	58
4.2 Процјена квалитета осталих класа аудио сигнала	61
5. Експериментална поставка и анализа перформанси у реалном окружењу.....	65
6. Закључак	74
Литература	76

Прилог	81
Прилог 1: Списак кориштених скраћеница	81
Прилог 2: Списак слика	86
Прилог 3: Списак табела	87
Прилог 4: Дијелови кодова кориштених у симулационом дијелу истраживања.....	88

Уз рад је приложен CD.

1. Увод

У данашње вријеме постоје многобројни покретачи динамичних истраживачких активности у вези са телекомуникационим технологијама које могу да обезбиједе веома висок проток и брзине преноса података. Неки од тих покретача су интензиван развој информационих и телекомуникационих технологија, значајно повећање броја корисничких уређаја, те строги захтјеви за пројектовање апликација сљедеће генерације. Трагање за слободним дијеловима електромагнетног спектра и помјерање ка све вишим фреквенцијским опсезима постало је саставни дио ових активности. Поред тога, комбиновање комплементарних телекомуникационих технологија у циљу унапређења перформанси система показало се као добра стратегија за постизање оптималних мрежних перформанси.

Један од главних проблема у обезбјеђивању стабилног и поузданог рада данашњих бежичних мрежа је појава сметњи узрокованих присуством различитих радиофреквенцијских (енг. *Radio Frequency* – RF) технологија у истом или блиском фреквенцијском опсегу. Због преоптерећења преносом у RF спектру, употреба опсега видљиве свјетлости је посљедњих година привукла велику пажњу. Системи оптичке бежичне комуникације (енг. *Optical Wireless Communication* – OWC) препознати су по свом значајном иновацијском потенцијалу у смислу веома високих брзина преноса података, отпорности на сметње, боље безбједности и ниске потрошње енергије. Конкретно, комуникација путем видљиве свјетлости (енг. *Visible Light Communication* – VLC), нова и веома ефикасна техника бежичне комуникације, сматра се обећавајућом алтернативом за комуникацију засновану на RF.

С обзиром на то да постоји мноштво потенцијалних апликација у модерној данашњици, примјена VLC представља атрактивно рјешење у домену бежичне комуникације, а посебно у сценаријима кратког домета. Једна од таквих апликација је свакако и пренос аудио сигнала путем видљиве свјетлости. С обзиром на то да је у данашње вријеме аудио стриминг надалеко кориштен и да подразумијева примјетан удио интернет саобраћаја, од велике је важности да квалитет испорученог аудио сигнала буде на високом нивоу. Управо ће у овом раду предмет истраживања бити анализа квалитета аудио сигнала пренесеног VLC комуникационом везом.

У другој глави дат је детаљан преглед концепта VLC. Представљене су опште карактеристике оптичких бежичних комуникација, те је дат осврт на њихов историјски развој, као и поступак стандардизације. Надаље, извршена је упоредна анализа VLC и RF технологија у којој су представљене многобројне предности које са собом доноси

комуникација путем видљиве свјетлости, али и потенцијалне мане. Представљена је и архитектура VLC система. С обзиром на константан развој и комерцијализацију, технологије базиране на кориштењу свијетлећих диода (енг. *Light-Emitting Diode* – LED) омогућавају нове перспективе за оптичку бежичну комуникацију. Због тога је дат и посебан осврт на LED, које се у VLC системима користе као предајници, а потенцијално и као пријемници. Представљена је основна класификација, као и архитектура VLC уређаја. Такође, посебно су издвојени постојећи изазови и ограничења у многобројним примјенама VLC технологије.

Трећа глава посвећена је методама процјене квалитета аудио сигнала. Дата је основна класификација звука. Детаљно је описана субјективна метода процјене квалитета аудио сигнала, а потом су описане и основне објективне методе процјене квалитета које моделују психоакустичке карактеристике људског слушног система.

У четвртој глави представљено је истраживање спроведено у симулационом окружењу. Детаљно је описан моделовани систем у симулацији, а потом су представљени и анализирани добијени резултати процјене квалитета, прво говорних сигнала, а потом и осталих класа аудио сигнала, који су пренесени VLC комуникационом везом. Анализиран је и допринос примјене заштитног кодовања на квалитет сигнала који се преноси.

Пета глава обухвата истраживање спроведено у реалном окружењу, прво у потпуном мраку, а потом и у условима спољашње освијетљености. Представљена је експериментална поставка, као и резултати процјене квалитета пренесеног аудио сигнала.

У шестој глави обједињене су основне карактеристике и могућности комуникације путем видљиве свјетлости, те су издвојени најважнији резултати и закључци који су добијени практичним радом. Наведени су и потенцијални правци будућих истраживања.

У Прилогу је наведен списак кориштених скраћеница, те списак свих слика и табела. Такође, приложени су и дијелови кодова од значаја који су кориштени у симулационом дијелу истраживања.

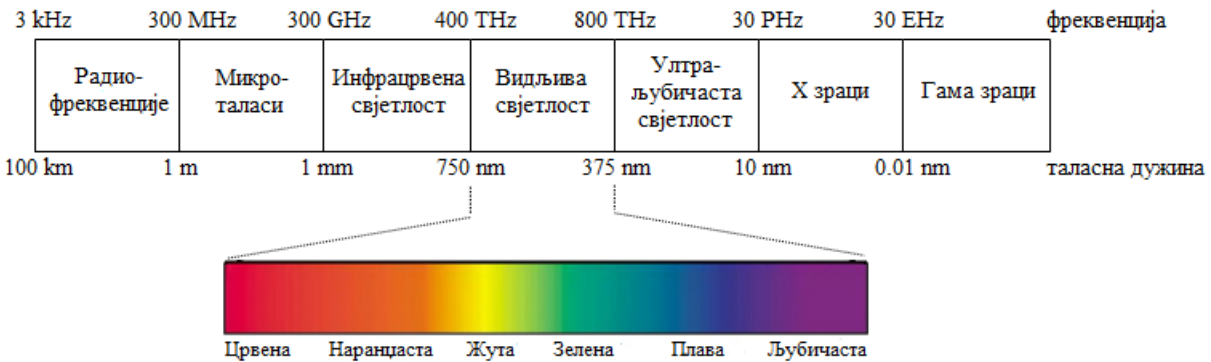
2. Комуникација путем видљиве свјетлости

2.1 Оптичке бежичне комуникације

Бежичне технологије су једна од великих прича о успјеху у историјском развоју технологије, остварујући сан људи да комуницирају са било ког мјеста у било које вријеме. Бежични уређаји, апликације и услуге већ су радикално промијенили начин на који људи живе, раде и социјализују се. Данас се термин „бежични“ широко користи као синоним за RF технологије као резултат свјетске доминације RF уређаја и система на тржишту. RF опсег чине фреквенције између 3 kHz и 300 GHz електромагнетног спектра и његову употребу стриктно регулишу локалне и међународне радиокомуникационе агенције. У већини случајева, подопсези су искључиво лиценцирани оператерима, нпр. оператерима мобилне телефоније или телевизијским емитерима.

Број мобилних корисничких уређаја на глобалном свјетском нивоу се значајно повећао у посљедњих неколико година, нарочито развојем, популаризацијом и масовном примјеном технологија у домену интернета објеката (енг. *Internet of Things – IoT*), у оквиру којег сви уређаји имају могућност повезивања и обраде података. Паметни телефони, таблети и сензори постају све чешћи у свакодневном животу људи. Због потребе корисника за континуираном комуникацијом и приступом интернету, те континуираним откривањем, ови уређаји постају све моћнији. Готово сви ови уређаји у модерној данашњици захтијевају повезаност 24 часа дневно, 7 дана у седмици, што захтијева још више ресурса, било од самих уређаја или од пратеће мрежне инфраструктуре.

Са стално растућом потражњом за бежичним апликацијама и услугама са великом количином података, потражња за RF спектром надмашује понуду, што доводи до загушења спектра те појаве сметњи узрокованих присуством различитих RF технологија у истом или блиском фреквенцијском опсегу [1]. Са циљем рјешавања такозваног „уског грла посљедње миље“ (енг. *last-mile bottleneck*) у широкопојасном приступу у RF комуникацијама, у посљедње вријеме се озбиљно разматрају, анализирају и оспособљавају виши дијелови електромагнетног спектра за бежичне комуникације, конкретно оптички опсег. Тако су настале оптичке бежичне комуникације. Оптички опсег укључује инфрацрвени (енг. *Infrared – IR*) опсег, опсег видљиве свјетлости (енг. *Visible Light – VL*), те ултраљубичасти (енг. *Ultraviolet – UV*) опсег. Оптички опсег, а нарочито у оквиру њега опсег видљиве свјетлости, привлачи пажњу академских институција и индустрије у посљедње вријеме, али је, ипак, још увијек недовољно истражен у поређењу са RF опсегом електромагнетног спектра. Електромагнетни спектар, од RF опсега па све до високофреквенцијског опсега гама зрака, са јасно издвојеним опсегом видљиве свјетлости, представљен је на Слици 2.1.



Слика 2.1 – Електромагнетни спектар

OWC представљају технологију која комбинује најбоље карактеристике преноса из бежичног и оптичког домена, тиме омогућавајући развој ултра-широкопојасних и агилних комуникационих система. OWC се примјењују у бројним комерцијалним системима, како у вањском тако и у унутрашњем окружењу, а који се крећу у опсегу од кратког домета и мрежа персоналног подручја (енг. *Personal Area Network* – PAN), па до градских мрежа. Конкретно, OWC технологија је компатибилна са другим добро успостављеним технологијама као што су оптичка влакна и унутрашње освјетљење, и може имати значајне користи од напретка у овим индустријама. Такође, компатибилност са постојећим RF системима је од великог значаја. Посљедиčno, OWC у посљедње вријеме константно биљежи повећање достигнутог пропусног опсега и подједнако значајно смањење трошкова. Наставком оваквих трендова, уз истовремени напредак оптичких влакана, очекује се да ће OWC убудуће обезбиједити још више широкопојасних и исплативијих система [2].

Каблови са оптичким влакнима који користе оптичке таласне дужине за пренос података су најбржи и најпоузданији метод преноса. Док су велике брзине достижене у оптичкој комуникацији заснованој на влакнима, у OWC су перформансе углавном ограничене сметњама услед других извора свјетлости и пропусног опсега предајника. Ово чини спектар видљиве свјетлости посебно погодним за пренос на кратком дometу у затвореном простору. Са друге стране, у поређењу са технологијама из RF опсега, OWC карактеришу супериорне перформансе као што су ултра-велики пропусни опсег, отпорност на електромагнетне сметње, висока сигурност, те висок степен просторног ограничења које доноси практично неограничену поновну употребу. Уређаји у домену OWC су знатно јефтинији од оних који се користе за RF пренос пошто користе дигиталну технологију основног опсега, а то чини пренос и пријем једноставнијим него у RF комуникацији, гдје кохерентне методе попут хетеродинског пријема за посљедицу имају већу сложеност система. Међутим, OWC пријемници направљени за некохерентни пријем показују нижу осјетљивост од RF антена због механизма фото-електричне конверзије. Надаље, OWC технологије раде у нерегулисаном спектру, те није потребна никаква накнада за лиценцирање, што доводи до веома исплативог рјешења. У затвореном простору, на везама

од тачке до тачке (енг. *Point-to-Point* – P2P) на кратким растојањима, са директном линијом оптичке видљивости (енг. *Line of Sight* – LOS), вриједност односа сигнал-шум (енг. *Signal-to-Noise Ratio* – SNR) је већа него што би била у случају RF комуникације. Такође, расположиви спектар се може поново користити у свакој просторији, јер ће генерисани сигнал бити ограничен унутар просторије, што не би био случај приликом RF комуникације.

Термин OWC се односи на било који тип оптичког преноса у невођеном медијуму, иако његове варијације засноване на радној фреквенцији могу имати различиту употребу. OWC системи који раде у опсегу видљиве свјетлости (таласне дужине 375 – 750 nm) и у којима се подаци шаљу модулацијом свјетлосних таласа из видљивог спектра, обично се називају комуникацијама видљивом свјетлости. VLC системи користе предности LED. Уопштено говорећи, сваки систем у коме се информације могу пренијети кориштењем неке врсте свјетлости видљиве човјековом оку може се назвати комуникацијом видљивом свјетлости. Међутим, основна идеја ове врсте комуникације јесте да се подаци пренесу на начин који је непримјетан људском оку, тако да је оно што се види само редовно освјетљење околине, без икакве примјетне промјене [1]. Двострука употреба LED у сврхе освјетљења и комуникације је одржив и енергетски ефикасан приступ и има потенцијал да унаприједи начин на који човјек користи свјетлост. VLC се може користити у широком спектру апликација, о чему ће више ријечи бити у Потпоглављу 2.6.1.

С друге стране, земаљски P2P OWC системи, познати и као оптички системи слободног простора (енг. *Free-Space Optical* – FSO), раде на фреквенцијама блиским IR опсегу (таласне дужине 750 – 1600 nm). Ови системи обично користе ласерске предајнике и нуде исплативу протоколно транспарентну везу са високим брзинама података, тј. 10 Gb/s по таласној дужини. Такође, пружају потенцијално рјешење за проблем тзв. *backhaul* „уског грла“.

Такође је порасло интересовање за комуникацију у ултраљубичастом дијелу спектра (енг. *Ultraviolet Communication* – UVC) као резултат сталног напретка у развијању оптичких извора/детектора који раде у UV опсегу (таласне дужине 200 – 280 nm). У овом такозваном дубоком UV опсегу, Сунчево зрачење је занемарљиво на нивоу Земље и то омогућава пројектовање детектора за бројање фотона са пријемницима широког видног поља који повећавају примљену енергију уз малу количину позадинског шума. Такви дизајни су посебно корисни за спољашње конфигурације без видног поља, са циљем подршке UVC мале снаге и кратког домета као што су бежичне сензорске и *ad-hoc* мреже [3].

2.1.1 Историјски развој OWC технологије

Сигнализација помоћу дима, бакљи или Сунчеве свјетлости може се сматрати историјским обликом OWC. Најранија употреба свјетлости у комуникационе сврхе приписује се старим Грцима и Римљанима који су, да би извршили испоруку једноставних порука у биткама, користили своје углачане штитове за бљесак Сунчеве свјетлости.

Крајем 18. вијека, у Наполеоновој Француској, инжењер Клод Шап је изумио оптички телеграф. Овај механизам се састојао од двије бочне шипке, зване индикаторима, које су причвршћене за дугачку шипку, названу регулатор. Ротацијом бочних шипки било је могуће створити низ различитих симбола. Оптички телеграфи су постављани у кулама, на удаљеностима од 10 до 15 km. Користећи ову структуру и ефикасно кодовање, било је могуће креирати до 98 различитих комбинација које су се могле видјети километрима далеко [1].

Крајем XIX и почетком XX вијека, хелиографи су се обично користили за војну комуникацију као дио сигналне опреме у тактичкој области. Ови уређаји подразумијевају пар огледала за усмјеравање контролисаног снопа свјетлости на удаљену станицу [4].

Једна од најзначајнијих историјских прекретница у области OWC је фотофон који је изумио Александар Грахам Бел, 1880. године. Помоћу фотофона, оптичком сигнализацијом су преносени гласовни сигнали на удаљености од 213 метара, кориштењем вибрирајућих огледала на предајнику. Гласовне вибрације су се рефлектовале и пројектовале Сунчевом свјетлошћу, те поново трансформисале у глас на пријемнику [5]. Фотофон никада није изашао као комерцијални производ, али се војни интерес за фотофон временом наставио, те су лучне лампе високог притиска кориштене као извори свјетлости за успостављање говорних комуникационих веза у тактичком пољу. Упркос популарности телефона, уређаја којег је такође патентирао Бел, научник је одувјек сматрао фотофон својим највећим изумом.

Прво јавно објављивање оперативних ласера, средином 1960. године, представља први крупан корак ка пројектовању OWC система какав је познат данас, код кога се LED или ласери користе као примарни извори свјетлости. Током шездесетих година прошлог вијека, многе лабораторије и истраживачки центри тестирали су пренос гласовних сигнала на удаљеностима и до 40 km кориштењем ласера, попут рубинског ласера или хелијум-неонског ласера. Тестиран је и први пренос телевизијског сигнала кориштењем OWC. Ипак, резултати су генерално били разочаравајући због велике дивергенције ласерских зрака и немогућности смањења утицаја атмосферских ефеката. Са развојем оптичких влакана седамдесетих година прошлог вијека, они су постали очигледан избор за оптички пренос на велике удаљености и помјерили су фокус са OWC система [6].

Током наредних неколико деценија, главни фокус активности везаних за OWC биле су тајне војне комуникације и свемирске примјене, укључујући међусателитске везе, те везе дубоког свемира. Продор OWC на масовно тржиште је у великој мјери остао ограничен, са изузетком IrDA (енг. *Infrared Data Association*) стандардизационог тијела чија су се рјешења за бежични пренос кратког домета показала као веома успјешна. FSO везе, кориштене као

редундантне везе тамо гдје инсталације оптичких влакана нису могуће или изводљиве, такође су се показале као ефикасне.

У модерној данашњици, нарочито са појавом и развојем VLC, OWC тржиште доживљава наглу експанзију. Кориштење LED као енергетски ефикасног рјешења у кућном освјетљењу, уличним свјетилкама, саобраћајним знацима, рекламним екранима итд., омогућава изузетно широк спектар примјена VLC, нарочито у мрежама кратког и средњег домета (безичне локалне мреже (енг. *Wireless Local Area Network* – WLAN), безичне персоналне мреже (енг. *Wireless Personal Area Network* – WPAN), те безичне мреже у области људског тијела (енг. *Wireless Body Area Network* – WBAN)), у мрежама возила, подводним мрежама, те комуникацији између уређаја (енг. *Machine-to-Machine* – M2M).

У последње вријеме се, такође, улажу значајни истраживачки напори са циљем побољшања перформанси FSO система у присуству атмосферских турбуленција и неповољних временских утицаја. Новији FSO системи високих перформанси могу се користити као саставни дио хетерогених безичних мрежа сљедеће генерације како би се обезбиједила конзистентна веза са аналогним оптичким влакнима, а значајна је и употреба у комуникацији између свемирских летјелица [3].

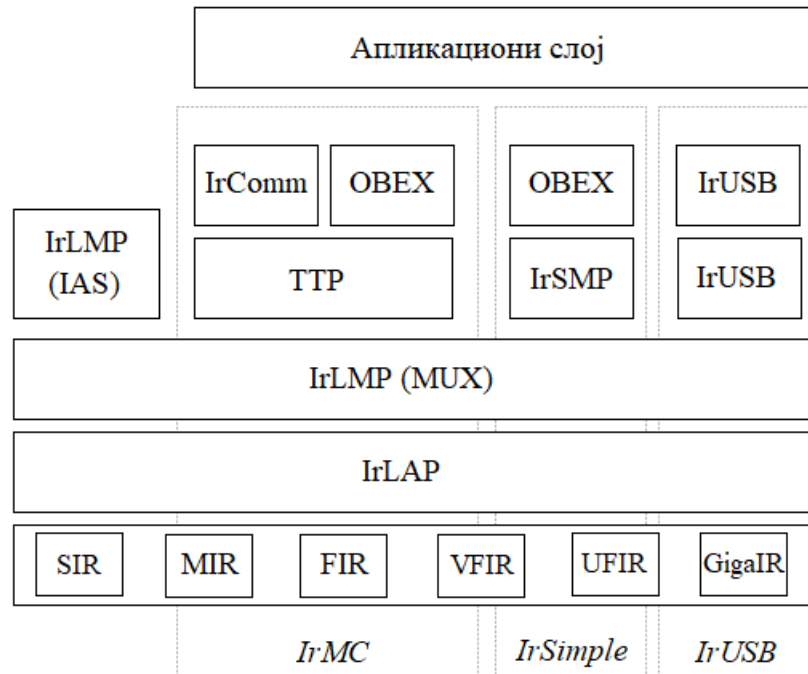
2.1.2 Стандардизација OWC технологије

Потенцијал OWC за широкопојасне, исплативе и безбједне комуникационе системе велике брзине преноса, током времена је привукао интересовање два главна тијела за стандардизацију – IEEE (енг. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) и IrDA. Деведесетих година прошлог вијека IrDA стандардизација се показала као веома ефикасна, док су многи недостаци зауставили даљи ток IEEE стандардизације. Са друге стране, у последњој деценији интензивна OWC стандардизација коју спроводи IEEE пружила је изузетно ефикасна рјешења, са нагласком на пољу VLC.

2.1.2.1 IrDA стандардизација

IrDA одржава свеобухватну листу стандарда који се углавном фокусирају на имплементацију оптичких безичних веза за персоналне комуникационе системе (енг. *Personal Communication Systems* – PCS). IrDA дефинише скуп OWC стандарда фокусирајући се на P2P везе ниске цијене и кратког домета, и то углавном за ручне уређаје. Такође, IrDA одржава свеобухватну листу техничких докумената који дефинишу рад PCS кратког домета преко инфрацрвених веза (енг. *Infrared Link* – IRL). Слично референтном моделу за отворено повезивање система (енг. *Open Systems Interconnection* – OSI), IrDA усваја слојевити приступ умрежавању, иако не постоји тачно „један-на-један“ мапирање између OSI и IrDA слојева. Пратећи слојевит приступ, различити протоколи се обично

имплементирају на сваком слоју, посебно на вишим, при чему је сваки протокол пројектован да задовољи потребе једног или више профила апликације [2]. Углавном се користе три профила апликације, од размјене контакт информација до ултра-брзог преноса датотека. На Слици 2.2 приказан је IrDA протокол стек, те кориштени апликациони профили.



Слика 2.2 – IrDA протокол стек

IrDA физички слој (енг. *IrDA Physical Layer* – IrPHY) садржи дефиниције оптичке везе, модулацију, кодовање, провјеру цикличне редунадансе (енг. *Cyclic Redundancy Check* – CRC) и фрејмер. Обезбјеђује везе велике брзине и скоро без грешака, између мобилних уређаја или мобилних уређаја и фиксних станица, и то помоћу полудуплексних P2P IRL на таласним дужинама од 850 – 900 nm. IrPHY стандарди укључују:

- серијски инфрацрвени (енг. *Serial Infrared* – SIR) стандард, са брзинама преноса 2.4 – 115.2 kb/s,
- средњи инфрацрвени (енг. *Medium Infrared* – MIR) стандард, са брзинама преноса 0.576 Mb/s и 1.152 Mb/s,
- брзи инфрацрвени (енг. *Fast Infrared* – FIR) стандард, брзине преноса 4 Mb/s,
- веома брзи инфрацрвени (енг. *Very Fast Infrared* – VFIR) стандард, брзине преноса 16 Mb/s,
- ултра-брзи инфрацрвени (енг. *Ultra Fast Infrared* – UFIR) стандард, брзине преноса 96 Mb/s, те
- гигабитни инфрацрвени (енг. *Gigabit Infrared* – Giga-IR) стандард, са брзинама преноса 512 Mb/s и 1.024 Gb/s, а још се стандардизује и брзина преноса до 10 Gb/s.

IrPHY даје препоруке за бројне IRL параметре са циљем побољшања безбједности везе, ненаметљивог рада, усклађености са прописима о безбједности очију и коже, те отпорности на позадинско зрачење. У случају брзина преноса SIR – UFIR стандарда, максимална дужина везе између уређаја не смије бити већа од 1 m (или 20 cm за имплементације у случају када су предајник и пријемник мале снаге). Величина оквира углавном зависи од брзине преноса података и варира између 64 B и 64 kB. Поред тога, већи блокови података могу се пренијети слањем више оквира узастопно. Блокови података до 8 MB могу се слати одједном. У комбинацији са ниском вриједности битске грешке (енг. *Bit Error Rate* – BER) која износи мање од 10^{-8} код SIR, односно мање од 10^{-10} код Giga-IR стандарда, а која је упоредива са BER у мрежама са оптичким влакнима, та комуникација би могла бити веома ефикасна у поређењу са другим бежичним рјешењима [2].

Кључне функције IrDA слоја везе су успостављање, одржавање и прекид веза преко IrPHY. Ово се постиже помоћу IrDA протокола за приступ линку (енг. *IrDA Link Access Protocol* – IrLAP), који представља варијанту HDLC (енг. *High-Level Data Link Control*) протокола допуњену карактеристикама које компензују нестабилну природу IrPHY. IrLAP ради у два различита режима:

- режим нормалног прекида (енг. *Normal Disconnected Mode* – NDM) када није присутна конекција на нивоу везе, нпр. када се уређај покрене или након што је претходно успостављена веза прекинута, те
- режим нормалног одговора (енг. *Normal Response Mode* – NRM), који обезбјеђује све процедуре за успостављање нове везе, укључујући иницијализацију уређаја, откривање уређаја и преговарање о вези.

Кључна одговорност коју има IrLAP јесте надгледање рада везе, те обезбјеђивање да оба комуникациона уређаја преузму свој прави дио временских оквира за пренос [2].

Основна функција IrDA протокола за управљање линком (енг. *IrDA Link Management Protocol* – IrLMP) јесте да се горњим слојевима обезбиједе шеме мултиплексирања, механизам контроле везе (енг. *Link Control* – LCon) и механизам за откривање услуга. IrLMP је раздвојен у два логичка ентитета:

- мултиплексер за управљање везама (енг. *Link Management Multiplexer* – LM-MUX),
- услуга приступа информацијама (енг. *Information Access Service* – IAS).

LM-MUX ентитет имплементира мултиплексирање оквира помоћу приступних тачака логичке услуге (енг. *Logical Service Access Point* – LSAP), које раде слично као TCP (енг. *Transmission Control Protocol*) портови. Свакој апликацији на вишем слоју се додјељује јединствени LSAP идентификатор. Апликације користе своје идентификаторе да би успоставиле IrLMP везе. Пар идентификатора извор-одредиште дефинише јединствену IrLMP везу и креира крајње комуникационе тачке потребне за демултиплексирање оквира унутар LSAP. Са друге стране, откривање услуге се врши у IAS ентитету који се састоји од

локалне базе података која чува асоцијације између апликација са идентификаторима, те од протокола за приступ информацијама (енг. *Information Access Protocol – IAP*) [2].

Први апликациони профил IrDA стандардизације је инфрацрвена мобилна комуникација (енг. *Infrared Mobile Communication – IrMC*). IrMC дефинише методе за размјену објеката који се обично налазе у мобилним телефонима (као што су контакт картице, именици, текстуалне поруке и евиденције позива). IrMC оријентисане апликације користе два основна протокола – инфрацрвени протокол за размјену објеката (енг. *Object Exchange – OBEX*) и TTP (енг. *Tiny Transport Protocol*). IrMC пружа генерички оквир за пренос података преко IRL, али је побољшан да боље одговара апликацијама „усмјери и сними“ (енг. *Point-and-Shoot – P&S*) које захтијевају краткотрајне везе. Кључни захтјев у P&S апликацијама је минимизирање времена интеракције између уређаја, а апликациони профил који то постиже модификацијом дуготрајних процедура у IrLAP и TTP назива се *IrSimple*. Са циљем даљег минимизирања времена интеракције између уређаја, развијен је *IrBurst* апликациони профил који замјењује OBEX ефикаснијим протоколом сесије, без промјене рада TTP и IrLAP.

Стандард за кориштење IRL као „замјену за жице“, познат као *IrComm*, дио је IrMC профила. *IrComm* обезбјеђује интерфејс који опонаша рад застарјелих серијских и паралелних портова преко IRL и узима у обзир три ствари: да су ови портови двосмјерни, да обично укључују пренос података преко више од једне жице, те да су осјетљиви на временски прорачун и подешавања. У ту сврху, *IrComm* креира вишеструке податке и контролне канале који опонашају електрични рад жица, а за репродукцију софтверске и хардверске контроле тока серијских и паралелних портова користи механизме контроле тока које обезбјеђују TTP и IrLAP. Напреднији профил са истом сврхом, који има за циљ да обезбједи апликације са интерфејсом који представља репродукцију USB (енг. *Universal Serial Bus*) 2.0 интерфејса, а који ради искључиво преко Giga-IR, назива се *IrUSB* [2].

2.1.2.2 IEEE стандардизација

Првобитни покушај IEEE OWC стандардизације укључивао је сценарио OWC имплементације у оквиру оригиналног IEEE 802.11 стандарда за WLAN, али је он касније укинут. Након увођења WLAN, 1997. године, објављен је почетни стандард IEEE 802.11 за физички (енг. *Physical – PHY*) слој и слој контроле приступа медијуму (енг. *Medium Access Control – MAC*). Три начина преноса су стандардизована у физичком слоју, од којих два користе сигнале у RF опсегу, гдје су методе директне секвенце и фреквенцијског скакања кориштене за ширење спектра, те један који користи инфрацрвену свјетлост. Сва три метода преноса обезбјеђују основну брзину података од 1 Mb/s и опциону брзину од 2 Mb/s. Физички слој овог стандарда је подијељен на протокол конвергенције физичког слоја (енг. *Physical Layer Convergence Protocol – PLCP*) и подслојеве зависне од физичког медијума

(енг. *Physical Medium Dependent* – PMD). PLCP припрема, односно парсира, јединице података које се емитују, односно примају. Са друге стране, PMD врши пренос, односно пријем, те модулацију, односно демодулацију, података под вођством PLCP. PHY слој који подразумева начин преноса путем инфрацрвене свјетлости подржава двије различите шеме импулсне позиционе модулације (енг. *Pulse Position Modulation* – PPM), и то 16-PPM за 1 Mb/s и 4-PPM за 2 Mb/s. Таласна дужина у случају вршне снаге предајника је између 850 и 950 nm, док је типична дужина везе ограничена на 10 m. Подразумијеване су двије главне технике преноса: P2P и дифузна [2].

MAC слој је заснован на техници ослушкивања медијума вишеструког приступа уз избегавање колизије (енг. *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* – CSMA/CA), гдје станица која има оквир спреман за пренос прво ослушкује канал. Ако је канал слободан током периода који је дужи од дистрибуираног размака између оквира (енг. *Distributed Inter-Frame Spacing* – DIFS), станица емитује. Ако је канал заузет, станица наставља са ослушкивањем све док канал не буде слободан у периоду дужем од DIFS. Након тога, станица примјењује метод за рјешавање колизија прије слања, односно бинарно експоненцијално повлачење (енг. *Binary Exponential Back-off*), како би се минимизовала вјероватноћа колизија оквира услед вишеструких истовремених преноса.

IR пренос је првобитно имплементиран у оквиру IEEE 802.11 јер је пружао низ значајних предности у односу на радио приступе. Предност је првенствено била кориштење нелиценцираног широкопојасног спектра. Такође, други бенефити су и ниска цијена имплементације, висока сигурност од прислушкивања, те могућност успостављања велике локалне мреже (енг. *Local Area Network* – LAN) преко одвојених инсталација без сметњи. Међутим, IRL су показале значајне недостатке, укључујући интерсимболску интерференцију изазвану вишепутним простирањем, потешкоће у ефикасном откривању оптичке колизије, сметње од амбијенталног свјетла и сјенке. Додатни недостаци су опасности за људско око, релативно велика потрошња енергије, ограничена покретљивост уређаја, те ограничено подручје покривања, с обзиром на то да се подразумева рад искључиво у затвореном простору. Због свих наведених недостатака, IR 802.11 никада није успјешно примијењен комерцијално. Као резултат тога, IEEE укида IR верзију 802.11 и 1999. године објављује WLAN стандарде који користе само радио таласе [2].

Умјесто тога, IEEE наставља да тежи OWC стандардизацији, те је као резултат у септембру 2011. године настао IEEE 802.15.7 стандард за комуникацију путем видљиве свјетлости (VLC) код које се користе комерцијалне LED за обезбјеђивање широкопојасне комуникације у затвореном простору. Стандард је објавила IEEE 802.15 радна група која специфицира стандарде бежичних специјалних мрежа, међу којима су, поред VLC, и WPAN, *Bluetooth*, IoT мреже, *mesh* мреже и др. Дефинисани су PHY и MAC слој за оптичке бежичне комуникације кратког домета користећи видљиву свјетлост у оптички

транспарентним медијима, чије су таласне дужине у опсегу од 375 до 750 nm. Брзине података које се постижу овим стандардом су довољне да подрже аудио и видео мултимедијалне услуге. Стандард, такође, узима у обзир и мобилност видљиве везе, компатибилност са инфраструктурама видљивог свјетла, те оштећења услед буке и сметњи од извора попут амбијенталног свјетла. Специфицирани MAC слој задовољава јединствене потребе видљивих веза. Стандард се придржава важећих прописа о безбједности човјекових очију [7].

Иницијално, документ се бави типовима уређаја у VLC системима. Стандард такође специфицира топологије и механизме модулације за VLC системе, док је велики дио IEEE 802.15.7 стандарда фокусиран на карактеристике физичког и MAC слоја. Детаљи о физичком и MAC слоју представљени су у Потпоглављима 2.5.1 и 2.5.2, респективно.

Поред тога, важни концепти као што су затамњивање (енг. *dimming*) и треперење (енг. *flickering*) детаљно су покривени у стандарду, пошто VLC систем мора да омогући управљање интензитетом свјетлости на начин који не утиче на саму комуникацију. Стандард се такође бави безбједносним проблемима у VLC. У том смислу, свјетлост има другачија својства од радио таласа, што омогућава нове смјернице када се ради о безбједности VLC система. Како је свјетлосни талас усмјерен и видљив, неовлаштено пресретање сигнала може се лако открити. Упркос томе, предложен шифарски механизам се заснива на симетричним кључевима, генерисаним на вишим слојевима протокол стека. Међу безбједносним услугама које нуди шифарски механизам су повјерљивост, аутентичност и заштита од понављања.

Ревизија IEEE 802.15.7 стандарда покренута је 2015. године, са неколико нових РНУ слојева и са MAC рутинама за подршку *Li-Fi* технологији и комуникацији оптичким камерама (енг. *Optical Camera Communication – OCC*), гдје уређаји за пренос укључују изворе свјетлости, а пријемници су дигитални фотоапарати са сочивом и сензором слике. Пошто је нови нацрт постао превелик, у марту 2017. радна група 802.15 одлучује да настави 802.15.7 само са OCC, и да креира нову засебну групу задатака посвећену новом стандарду за *Li-Fi*, коме је очигледно био потребан и значајно ревидиран MAC слој, поред нових РНУ слојева. У априлу 2019. године званично је објављена ревидирана верзија првобитног 802.15.7 стандарда који има подршку за OCC, а кориштене свјетлосне таласне дужине у комуникацији кратког домета су од 190 до 10 000 nm [8]. У септембру 2020. године одобрена је допуна овог стандарда, дефинисана као 802.15.7a [9]. Овај амандман омогућава брзине преноса података до 100 Mb/s и дизајниран је за Р2Р комуникацију, те за комуникацију од једне до више тачака (енг. *Point-to-Multipoint*). Укључено је прилагођавање на различите услове канала и одржавање повезаности током велике мобилности (брзине до 350 km/h), ублажавање треперења, RF коегзистенција, те домет комуникације до 200 m. МИМО (енг. *Multiple-Input and Multiple-Output*) техника се користи за рјешавање високих нивоа

оптичких сметњи уз одржавање високе брзине преноса података. Укључени су механизми за пренос података који омогућавају хетерогени рад са постојећим RF стандардима бежичног преноса података. Могућност коегзистенције и сарадње са постојећим RF системима наставља да повећава интересовање за кориштење и даље развијање оваквог облика оптичке бежичне комуникације [10-12].

2.2 Упоредна анализа RF и VLC технологија

Посљедњих деценија је реализован велики напредак у комуникационим технологијама. У погледу бежичне комуникације, *Wi-Fi* је постао доминантна техника за приступ интернету. Међутим, фактори као што су преоптерећење преносом у RF спектру и велика потражња за бежичним комуникацијама покрећу нове технологије и истраживања. У том погледу, многе VLC студије се фокусирају од тога да употреба VLC буде допуна постојећој *Wi-Fi* технологији како би се задовољиле потребе тренутне потражње за пропусним опсегом у бежичним мрежама, па све до употребе VLC као средства комуникације са циљем да се у неким сценаријима у потпуности замијени *Wi-Fi* [1]. У сваком случају, треба узети у обзир предности и недостатке које VLC нуди у поређењу са *Wi-Fi*, другим RF технологијама, али и IoT технологијама. У Табели 2.1 је представљено опште поређење између VLC и појединих водећих RF и IoT технологија.

Главна предност видљиве свјетлости је ширина спектра у поређењу са RF опсегом. Додјелјивање фреквенција у радиоталасном опсегу електромагнетног спектра је изузетно ограничено, регулисано је од стране сваке земље, а координисано од стране међународних телекомуникационих институција. Дакле, свака земља има своју регулативу у вези са фреквенцијама које се додјелују за сваку врсту употребе, од војне употребе до емитовања садржаја на АМ (енг. *Amplitude Modulation*) и FM (енг. *Frequency Modulation*) радијима [1]. Мобилним оператерима је економичније да прибављају нове локације у спектру него да граде више базних станица ради повећања капацитета. Штавише, то смањује шансе потенцијалних будућих конкурената да уђу на тржиште. Као релативно нова технологија, *Wi-Fi* уређаји преносе сигнал у два основна опсега: 2.4 GHz и 5 GHz. Са шестом *Wi-Fi* генерацијом и IEEE 802.11ax стандардом отпочела је и употреба 6 GHz опсега. Сви наведени опсеги су лоцирани у нелиценцираним регионима спектра. Ипак, управљање спектром у великој мјери постаје проблем јер сталним порастом потражње за бежичним преносом података RF спектар постаје све загушенији, те се преостали спектар смањује. Преласком у фреквенцијски опсег видљиве свјетлости који је потпуно слободан, ови проблеми се надилaze и стварају се разне нове могућности, како комерцијалне, тако и истраживачке.

Табела 2.1 – Упоредни преглед водећих RF и IoT технологија са VLC

	Wi-Fi	Bluetooth	LoRa	VLC
<i>Спектар</i>	2.4 GHz / 5 GHz / 6 GHz	2.4 GHz	433 MHz / 868 MHz / 915 MHz	400 – 800 THz
<i>Сигурност</i>	Ограничена	Ограничена	Висока	Висока
<i>Домет</i>	Умјерен	Низак	Изузетно висок	Ограничен
<i>Комплексност система</i>	Висока	Висока	Умјерена	Ниска
<i>Брзина преноса</i>	Висока	Умјерена	Ниска	Изузетно висока
<i>Електромагнетна интерференција</i>	Да	Да	Да	Не
<i>Потрошња енергије</i>	Умјерена	Умјерена	Изузетно ниска	Ниска

С обзиром на то да је фреквенцијски опсег видљиве свјетлости између 400 и 800 THz, то значи да видљива свјетлост има 10 000 пута већи опсег од радио таласа. Посљедично, VLC има потенцијал да прими више корисника и обезбиједи значајно веће брзине преноса података за сваког корисника користећи шири пропусни опсег за пренос информација [13]. Када је у питању *Wi-Fi*, теоријски највећа могућа брзина преноса података постиже се актуелном шестом *Wi-Fi* генерацијом и IEEE 802.11ax стандардом, и износи 9.6 Gb/s. У реалном окружењу та брзина је ипак значајно мања. Са друге стране, захваљујући високој фреквенцији свјетлосних таласа, експерименти из VLC домена увелико постижу импресивне резултате, достижући брзине од преко 10 Gb/s [14-16], па чак и до 46 Gb/s [17]. Предност у погледу остварљиве брзине преноса ће се у великој мјери одржати и у односу на предстојећу седму *Wi-Fi* генерацију и IEEE 802.11be стандард, код којег ће, иако се теоријски налаже остварљива брзина преноса до 46 Gb/s, она у реалном окружењу бити значајно нижа.

Велика предност VLC је кориштење постојеће инфраструктуре за пружање комуникационих услуга уз додатак неколико релативно једноставних и јефтиних *front-end* компоненти које раде у основном опсегу. Самим тим, трошкови имплементације VLC су мањи јер је потребно само неколико надоградњи постојеће инфраструктуре освјетљења, а не почетни трошкови постављања цијелог комуникационог система. LED сијалице, које се данас широко користе, већ играју улогу освјетљења. Ови високо контролисани извори свјетлости су енергетски изузетно ефикасни, што их чини еколошки прихватљивим технолошким рјешењима. Са VLC, LED сијалице преносе податке кроз освјетљење, па самим тим енергија која се користи за комуникацију не би стварала додатне трошкове.

Стога, са милијардама LED сијалица које раде широм свијета у нелиценцираном фреквенцијском опсегу којег је изнова могуће користити, какав је опсег видљиве свјетлости, могу постојати милијарде потенцијалних VLC предајника.

Због својих својстава ширења и чињенице да не постоји интерференција са постојећим RF сигнаlima, свјетлост нуди значајне сигурносне предности у поређењу са радио таласима. Када је *Wi-Fi* приступна тачка конфигурирана, радио таласи могу да се шире у складу са капацитетом емитовања антене, који може да достигне стотине метара. У овом процесу, таласи превазилазе зидове и друге чврсте површине и могу представљати сигурносни ризик, јер може доћи до покушаја пресретања и прислушкивања. Супротно томе, свјетлосни таласи не иду даље од зидова и других чврстих површина, тиме нудећи много сигурније окружење, гдје се у суштини преноси оно што људско око види. Ова могућност манипулисања свјетлосним таласима је још једна велика предност овог облика комуникације. Такође, с обзиром на то да VLC подразумева емитовање високо усмјерене и ограничене видљиве свјетлости, могућа је коегзистенција многих неометајућих комуникационих веза у непосредној близини. То омогућава већу густину података и поновно просторно кориштење опсега за модулацију у сусједним комуникационим ћелијама [13].

Значајна је чињеница да, у условима освјетљења, видљива свјетлост не представља опасност по здравље. За разлику од IR свјетлости, видљива свјетлост задовољава прописе о безбједности очију и коже што је чини безбједном за употребу у било ком сценарију са далеко већом емитованом оптичком снагом. То даје значајну предност VLC над IR комуникацијом, у погледу даљине преноса. Надаље, предност кориштења LED сијалица у односу на флуоресцентне, поред тога што су енергетски ефикасније, јесте чињеница да током одлагања покварених флуоресцентних сијалица може доћи до испуштања живе, што може имати штетне проблеме за животну средину и здравље.

Међутим, свјетлост има своје недостатке, а можда најзначајнији је њено треперење. Треперење је велики проблем јер се свјетлост модулише веома великом брзином и може оштетити људско око. Треперење може изазвати мигрене, главобоље, те врло негативне и опасне појаве у понашању особа са аутизмом. Због тога се врше многа истраживања са циљем да се поступци ублажавања треперења морају примијенити за VLC са сценаријима истовременог освјетљења [18]. Затамњивање је такође проблем за унутрашње окружење гдје је потребно контролисати количину свјетлости према захтјевима корисника. Видљива свјетлост је, такође, склона сметњама из многих других извора свјетлости – вјештачких (класичне електричне и флуоресцентне сијалице, друге LED, итд.) и природних (Сунчева свјетлост). Ово може представљати велики изазов за примјену VLC система, иако постоје вишеструки истраживачки напори да се овај проблем ублажи [13].

2.3 LED као предајник у VLC систему

Технологије освјетљења су кроз историју прешле дуг пут, од ватре и свијећа па до данашњих LED сијалица. Иако се класичне електричне сијалице и даље користе, због велике количине корисне енергије која се губи у виду топлоте оне су данас у великој мјери замијењене LED сијалицама. Дужи животни вијек, ниска цијена и свјетлосна ефикасност LED сијалица неке су од значајних предности у односу на традиционалне технологије освјетљења.

LED је полупроводнички уређај који има способност да промијени електричну енергију директно у свјетлосну енергију. Кључна структура у LED је полупроводнички чип који је допиран нечистоћама како би се створио p - n спој. Носиоци наелектрисања, електрони и шупљине, улазе у спој са електрода различитих напона. Приликом примјене напона, електрон се судара са шупљином и пада на нижи енергетски ниво, тиме ослобађајући енергију у облику фотона који се види као емитована видљива свјетлост. Овај ефекат се назива електролуминисценција. Свјетлост се емитује у видљивом спектру, који варира од ниских до високофреквенцијских таласа, који одговарају одређеној боји. Таласна дужина емитоване свјетлости, а тиме и њена боја, зависи од енергетске баријере материјала који чине p - n спој. Развој свијетлећих диода је започео са диодама од Галијум-арсенида (GaAs) које су емитовале инфрацрвену и црвену свјетлост. Даљи напредак у науци о материјалима омогућио је израду диода са све краћим таласним дужинама, које су емитовале свјетлост разних боја. У Табели 2.2 су представљене поједине боје емитоване свјетлости и одговарајући полупроводнички материјал, као и таласна дужина емитоване свјетлости и примјена од значаја.

Постоји много разлога за интензиван раст употребе LED сијалица у данашње вријеме, а најзначајније предности овог типа извора свјетлости су енергетска ефикасност, издржљивост и ниска цијена. LED могу смањити потрошњу енергије за више од 80% у општој и кућној расвјети и могу трајати 25 пута дуже од традиционалних електричних сијалица. Поред тога, имају значајно већу свјетлосну ефикасност од традиционалних извора освјетљења. Такође, не садрже опасне материје као што је жива. Свијетлеће диоде карактерише свестраност у контроли спектра зрачења, тако да су у стању да генеришу свјетла са великом разноврсношћу боја и интензитета. Због свих предности, LED сијалице се користе у различитим уређајима, као што су паметни телефони, возила, видео монитори и саобраћајни знакови. Будућност стамбеног освјетљења је чврсто заснована на LED свјетлима. Употреба ове технологије донијела је многе предности индустрији, па је тако она, између осталог, нашла своју примјену и у VLC, с обзиром на то да се инхерентни модулациони пропусни опсег свијетлећих диода може искористити и за обезбјеђивање улоге комуникационог уређаја. LED сијалице су постале главни медијум који се користи за комуникацију видљивом свјетлошћу, интегришући различита окружења у којима би било

корисно користити свјетлост као вид комуникације, што је допринијело растућем интересовању за VLC. Због тога је уобичајено изабрати ову врсту сијалице у VLC системима [13].

Табела 2.2 – Таласне дужине емитованих боја и одговарајући полупроводнички материјали

Полупроводнички материјал	Таласна дужина	Боја	Примјена од значаја
Галијум-Арсен-фосфид (GaAsP)	680 nm	Црвена	Анализа крви
	660 nm		Пулсна оксиметрија
	630 – 640 nm		Црвено свјетло на семафору
Галијум-Арсен-фосфид (GaAsP)	605 – 620 nm	Амбер (боја ћилибара)	Ласерске терапије
Галијум-фосфид (GaP)	585 – 595 nm	Жута	Жуто свјетло на семафору
Индијум-Галијум-Алуминијум-фосфид (InGaAlP)	550 – 570 nm	Зелена	Зелено свјетло на семафору
Силицијум-карбид (SiC)	430 – 505 nm	Плава	Инструменти за поправку зуба
Алуминијум-Галијум-нитрид (AlGaIn)	410 – 420 nm	Љубичаста	Терапије за кожу

Најчешћа комерцијална LED сијалица која се користи у данашње вријеме јесте LED бијело свјетло. За разлику од осталих боја које су директно повезане са LED полупроводничким материјалима, двије конвенционалне методе се користе да би настала бијела LED свјетлост. Прва метода се састоји од употребе RGB (енг. *Red, Green, Blue*) LED за производњу бијеле свјетлости, што се ради комбиновањем црвених, зелених и плавих LED, тиме стварајући бијело свјетло. Ова врста бијеле LED омогућава контролу над емитованом бојом. Мјешавина различитих интензитета LED повезана је са добијеном хроматичности бијеле свјетлости. На примјер, бијела свјетлост са већим садржајем плаве свјетлости се назива хладна бијела свјетлост, неутрална бијела свјетлост се добија једнаким интензитетима ове три диоде, док се топла бијела свјетлост добија уколико је у мјешавини свјетлости већи садржај црвене свјетлости. Друга метода користи фосфор за производњу бијеле свјетлости. Ово се ради кориштењем плаве LED сијалице обложене фосфорним слојем. Фотони које генерише плава LED се шаљу кроз фосфорни слој, а дио њих се претвара у жуту. И жути и плави фотони, распоређени у широком спектру, комбинују се и стварају хладно, неутрално или топло бијело свјетло. Постоји неколико разлика између ове двије методе, а обје имају низ предности и мана. Генерално, фосфорна метода је чешћа међу

LED сијалицама, јер је јефтинија и ефикаснија од RGB методе. Међутим, у смислу комуникације видљивим свјетлом, RGB сијалица има тенденцију да буде кориснија, због контроле коју даје над свјетлошћу [1]. IEEE 802.15.7 стандард описује метод модулације заснован искључиво на интензитету RGB LED [7].

Иако првенствено ради као извор свјетлости, LED такође може да изврши оптичку конверзију у електричну, односно, LED се такође може користити и као сензор на пријему. Свијетлеће диоде могу да дјелују као пријемници због чињенице да се, примјеном свјетлости на LED, ствара мала струја која је пропорционална интензитету свјетлости. Овај феномен је познат као фотоструја. Док фотодиода има широк спектрални одзив, будући да је у стању да детектује ултраљубичасто и инфрацрвено свјетло, LED се може сматрати селективном фотодиодом, због чињенице да детектује ужи опсег таласних дужина, тиме смањујући присуство шума и сметњи. Уопштено говорећи, LED може да детектује исте или више фреквенције свјетлости коју емитује. Дакле, црвена LED би могла да детектује црвена, зелена и плава свјетла, док би плава LED детектовала само плаво свјетло. Ипак, спектрални одзив LED може варирати у зависности од емитоване фреквенције. Уобичајено, у спектру видљиве свјетлости се спектрални одзив благо помјера ка вишим фреквенцијама, односно ка плавој боји. Стога, на примјер, постоји могућност да зелена LED не детектује зелено свјетло пошто зелена боја има веома узак опсег спектралног одзива, различит од емитоване фреквенције [1].

Постоји неколико типова LED, од којих свака има своје карактеристике, што их чини погодним за разне примјене у VLC. У зависности од материјала који се користи у производњи чипа, свјетлост се емитује у одређеном дијелу видљивог спектра. Као резултат, фотон ће бити емитован са карактеристичном таласном дужином, што резултује бојом. Галијум-арсенид (GaAs) и Галијум-фосфид (GaP) су основни примјери једињења која се користе у LED. Главни типови LED и њихове основне карактеристике су дати у наставку. Упоредни преглед појединих типова LED дат је у Табели 2.3. Сваки тип LED има своје посебне карактеристике које им омогућавају да буду посебно одабране за различите врсте примјена са специфичним захтјевима.

Фосфор-конвертоване LED (енг. *Phosphor Converted LED* – pc-LED): pc-LED се широко користе и карактерише их ниска сложеност и ниска цијена. Њихово кориштење представља једну од метода за добијање бијеле свјетлости. Састоје се од плавог LED чипа, направљеног од Индијум-Галијум-нитрида (InGaN) који је обложен фосфорним слојем од Итријум-Алуминијум-граната (YAG). Функција фосфорног слоја је претварање једног дијела плаве свјетлости у зелену, жуту и црвену, док се други дио плаве свјетлости емитује. Комбинација емитованих свјетлости резултује бијелом свјетлошћу. Ипак, опсег ове врсте LED је ограничен због спорог одзива фосфора [13].

Табела 2.3 – Упоредни преглед основних карактеристика различитих типова LED

	pc-LED	Multi-Chip LED	OLED	μ-LED
Пропусни опсег	3 – 5 MHz	10 – 20 MHz	мањи од 1 MHz	већи од 300 MHz
Свјетлосна ефикасност ¹	130 lm/W	65 lm/W	45 lm/W	-
Цијена	Ниска	Висока	Изузетно ниска	Висока
Сложеност	Ниска	Умјерена	Висока	Изузетно висока
Примјена	Освјетљење	Освјетљење	Екрани	Био-сензори

LED са више чипова (енг. *Multi-Chip LED*): Структура овог типа LED подразумијева три или више LED чипова који емитују различите боје, обично црвену, зелену и плаву (RGB), са циљем производње бијеле свјетлости. У зависности од интензитета свјетлости различитих чипова, може се постићи контрола боје која се емитује, што представља значајну предност ових диода. Са друге стране, LED са више чипова имају нижи индекс приказивања боја (енг. *Color Rendering Index – CRI*) од pc-LED, те су у поређењу са њима скупље и сложеније. CSK (енг. *Color Shift Keying*) модулација је креирана посебно за овај тип LED, и о њој ће више бити ријечи у Тачки 2.5.1.1.

Органске LED (енг. *Organic LED – OLED*): Овај тип LED се састоји од низа танких органских филмова између два проводника. Када се примијени електрична струја, емитује се свјетлост. OLED се најчешће користе у екранима паметних телефона. Велика предност ове врсте технологије је могућност изградње транспарентних и флексибилних уређаја. Ипак, типични фреквенцијски одзив за OLED је реда величине 100 kHz, и далеко је мањи у односу на одзив за неорганске LED, што чини OLED технологију мање погодном за апликације велике брзине. Такође, животни вијек типичних бијелих OLED је мањи од животног вијека типичне неорганске LED.

Микро LED (енг. *Micro LED – μ-LED*): Низови μ-LED засновани на Алуминијум-Галијум-нитриду (AlGaIn) обично емитују свјетлост у опсегу таласних дужина од 370 до 520 nm, са могућношћу кориштења конверзије таласне дужине за производњу бијеле свјетлости. Новија истраживања показују да модулациони пропусни опсег достиже чак 1.31

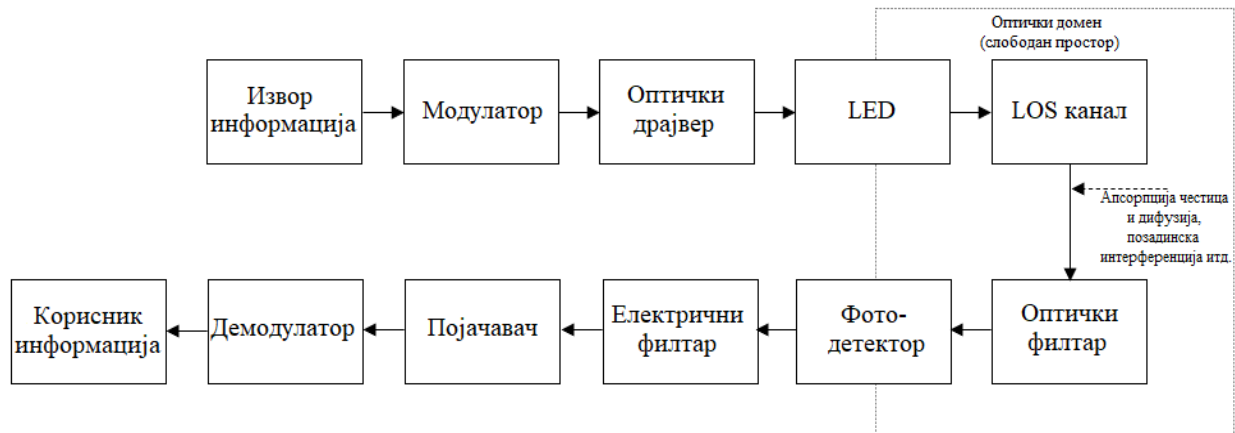
¹ Свјетлосна ефикасност, мјерена у луменима по вату, представља метрику која дефинише колико добро извор свјетлости производи видљиву свјетлост. Лумен је SI изведена јединица свјетлосног флукса. То је количина свјетлости која пада на јединичну сферну површину са јединичне удаљености од извора од једне канделе.

GHz, те да се постиже брзина преноса од скоро 6 Gb/s [19], а на краћим растојањима и преко 10 Gb/s [14]. Велики пропусни опсег је могућ због веома ниске капацитивности у LED. μ -LED се обично спајају у дисплеје, омогућавајући паралелну комуникацију велике густине.

LED са резонантном шупљином (енг. *Resonant Cavity LED* – rc-LED): Ефикасност екстракције конвенционалних LED је лоша због велике разлике у индексу преламања између полупроводника са уским размаком и околног медијума који је типично ваздух. Развијање rc-LED високе освијетљености, са циљем побољшања екстракције свјетлости близу IR опсега, од великог је значаја за примјену дисплеја у боји у VLC. rc-LED обично емитују свјетлост на приближно 650 nm, са уском ширином линије, и могу се модулисати фреквенцијом од преко 100 MHz [13].

2.4 VLC систем

С обзиром на то да VLC користи свјетлост за пренос информација, основна идеја у реализацији VLC апликација јесте истовремено обезбјеђивање освјетљења и комуникације. Стога, VLC системи увијек садрже компоненте за пренос и пријем свјетлости. Типичне VLC везе користе LOS конфигурацију. Архитектура VLC система приказана је на Слици 2.3.



Слика 2.3 – Архитектура VLC система

У већини практичних случајева, LED, које су детаљно описане у Поглављу 2.3, користе се као предајници. LED емитују некохерентну свјетлост. Стога се, у циљу слања података, врши модулација интензитета (енг. *Intensity Modulation* – IM) свјетлости, гдје се преношени сигнал модулише у тренутну оптичку снагу LED. Интензитет зрачења се контролише директном струјом кроз LED и мора бити у радном региону унутар линеарног дијела струјно-напонске (I - V) карактеристике LED. Током преноса свјетлости долази до губитка квалитета свјетлосног сигнала, и то због дифузије честица унутар проводника чиме настаје

термички шум, те због шума генерисаног фотонима који настаје услед инхерентне интерференције амбијенталног свјетла. Са циљем смањења сметњи, могу се користити филтри. На пријемној страни, употреба појачача чини сигнале мање склоним сметњама и шуму. С обзиром на то да ИМ мијења тренутну снагу LED, на пријемној страни се за извођење обрнутог поступка конверзије користи метода директне детекције (енг. *Direct Detection* – DD). DD користи фотодиоду за директно примање свјетлости и за претварање упадне снаге оптичког сигнала у пропорционалну струју. Коначно, сигнал се демодулише да би се добила оригинална информација. Подешавање је далеко једноставније од кохерентне детекције која се користи у RF, гдје се локални осцилатор користи да се из носиоца издвоји сигнал у основном опсегу. Фреквенције модулације се одржавају довољно високим да би се избјегло треперење које може изазвати штетне ефекте. У оквиру VLC је врло важно да на јачину освијетљености не утиче манипулација свјетлошћу током преноса информација. Дакле, тип LED која се користи може да има директан утицај на перформансе VLC система [1].

Пријемници су одговорни за примање свјетлости и њено претварање у електричну струју. Најчешће се фотодиоде (енг. *Photodiode* – PD) користе као пријемници у VLC комуникационим системима, првенствено због велике брзине и линеарне фотодетекције. Генерално, постоје двије врсте фотодиода које се користе у VLC системима, а то су PIN фотодиода (PIN PD) и *Avalanche* фотодиода (APD), при чему APD има већи добитак. Недостатак употребе APD је вишак шума који генерише већа фотоструја. У погледу толеранције на високе температуре и ниже цијене, PIN PD су доминантне у VLC, а такође су идеалне у сценаријима гдје пријемник буде преплављен свјетлошћу релативно високог интензитета. *Avalanche* фотодиоде су корисније са slabим интензитетом упадне свјетлости. Типичне силицијумске фотодиоде које се користе у VLC имају криве одзива са максимумом на 800 nm, са већом осјетљивошћу на црвено свјетло, него на зелено или плаво [13].

Међутим, фотодиоде су изузетно осјетљиве и могу да „хватају“ свјетлосне таласе и изван спектра видљиве свјетлости, као што су UV и IR. Такође, у спољашњем окружењу, а нарочито у случају излагања Сунчевој свјетлости, лако долази до њиховог засићења. Из тог разлога, друге компоненте се могу користити као пријемници у VLC. Једна од њих је и камера паметног телефона, која омогућава сваком мобилном телефону да прима податке које шаље VLC предајник [20]. Надаље, да би се превазишао недостатак у виду потребе за екстерним напајањем фотодиода, могуће је користити соларни панел као оптички пријемник, што представља економичније и мање сложено рјешење [21]. Ипак, соларни панели имају много спорији одзив, стога се у пракси много рјеђе користе. Поред ових уређаја, као пријемници могу да се користе и саме LED, како је описано у Поглављу 2.3. С обзиром на чињеницу да LED могу да функционишу и као предајници и као пријемници, омогућава се креирање система са само једном LED у свакој тачки, па поред тога што су

веома приступачне и популарне компоненте, LED чине VLC апликације још лакшим за кориштење.

Генерално, постоје три типа конфигурације пријемника који се могу користити у VLC, а то су пријемници са једним елементом, пријемници са селективним комбиновањем (или пријемници који комбинују различитост), те пријемници за разноврсност слике који користе низ фотодетектора и сочива за раздвајање сигнала који долазе из различитих извора. Пријемници са једним елементом су најпопуларнији и највише кориштени међу овим опцијама. Пријемници са диверзитетом угла, још једна конфигурација пријемника, имају широко видно поље (енг. *Field of View* – FOV), али су гломазни и скупи, те су направљени за прикупљање свјетлости само са дифузних веза. С обзиром на широк спектар преференција, конфигурација пријемника у VLC систему је углавном дизајнирана на основу перформанси које систем треба да постигне.

Front-end оптички пријемник, чији је избор и дизајн компромис између брзине и осјетљивости, обично се састоји од претпојачавача који појачава слабу струју индуковану у фотодиоди. Појачавачи који могу да се користе у VLC се класификују у три основне категорије, а то су појачавач ниске импедансе, појачавач високе импедансе и трансимпедансни појачавач (енг. *Trans-Impedance Amplifier* – TIA). Ако се користи појачавач високе импедансе, термички шум се значајно смањује, што побољшава осјетљивост пријемника. Главни недостатак у том случају је низак пропусни опсег. Тај проблем се може умањити кориштењем еквилизатора. Термички шум преовладава у пријемнику спојеном на *front-end* ниске импедансе, што у великој мјери чини ову класу појачавача непрактичном за употребу у VLC системима. Са друге стране, TIA обезбјеђује једнаку равнотежу високе осјетљивости заједно са великим пропусним опсегом, што чини ову класу појачавача нашироко коришћеном у различитим VLC системима. Још један тип појачавача који може понудити потенцијалне предности у односу на конвенционални пријемник у погледу подесивости и перформанси шума јесте фотопараметарски појачавач (енг. *Photo Parametric Amplifier* – PPA) [13].

Главне компоненте које интегришу VLC системе, предајник и пријемник, генерално прилагођавају три слоја протокол стека – физички слој, слојеве везе података и слој апликације. Физички и MAC слој ће детаљније бити описани у Потпоглављима 2.5.1 и 2.5.2, респективно.

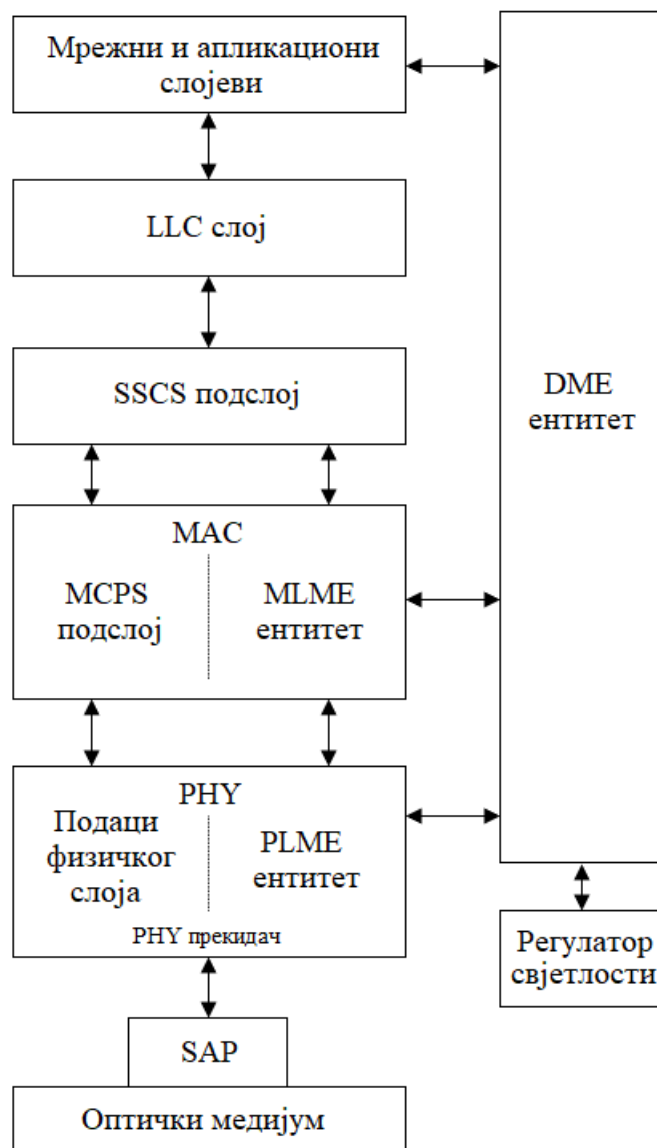
2.5 Класе и архитектура VLC уређаја

IEEE 802.15.7 стандард дефинише три основне класе VLC уређаја, и то инфраструктуру, мобилне уређаје и возила. Основне карактеристике класа VLC уређаја, на основу стандарда, приказане су у Табели 2.4.

Табела 2.4 – Класе VLC уређаја и њихове карактеристике

	Инфраструктура	Мобилни уређаји	Возила
Фиксни координатор	Да	Не	Не
Фактор форме	Неограничен	Ограничен	Неограничен
Извор енергије	Широк	Ограничен	Умјерен
Извор свјетлости	Јак	Слаб	Јак
Мобилност	Не	Да	Да
Домет	Кратак/дуг	Кратак	Дуг
Брзина преноса	Висока/ниска	Висока	Ниска

VLC уређај, чија је архитектура приказана на Слици 2.4, састоји се од PHY слоја, који садржи примопредајник са IM/DD, и од MAC слоја који омогућава приступ физичком каналу за све врсте преноса. Слој логичке контроле везе (енг. *Logical Link Control – LLC*) приступа MAC слоју преко подслоја конвергенције специфичног за услугу (енг. *Service-specific Convergence Sublayer – SSCS*). MAC слој пружа двије услуге којима се приступа преко двије сервисне приступне тачке (енг. *Service Access Point – SAP*). Управљању MAC слојем се приступа преко приступне тачке MAC ентитета за управљање везом (енг. *MAC Link Management Entity SAP – MLME SAP*), док се MAC подацима приступа преко приступне тачке MAC подслоја заједничког ентитета (енг. *MAC Common Part Sublayer SAP – MCPS SAP*). На PHY слоју су садржани подаци (енг. *PHY Layer Data – PLD*), те ентитет за управљање физичким слојем (енг. *PHY Layer Management Entity – PLME*). Ентитет за управљање уређајима (енг. *Device Management Entity – DME*), с обзиром на то да има приступ појединим атрибутима у вези са затамњивањем, пружа информације о затамњивању и MAC и PHY слоју. DME такође контролише PHY прекидач за избор оптичких извора, односно фотодетектора, у уређајима који се састоје од више предајника, односно пријемника. PHY прекидач се повезује са оптичком SAP и повезује се на оптички медијум, који може да се састоји од једног или више предајника, односно пријемника. Виши слојеви се састоје од слојева мреже и апликације [2].



Слика 2.4 – Архитектура VLC уређаја

2.5.1 Физички слој

Физички слој је одговоран за пренос података (бита) кроз комуникациони канал. Представљање сигнала, начин слања сигнала, успостављање комуникације, тип модулационог поступка – само су неки од аспеката које дефинише физички слој. Приликом имплементације VLC физичког слоја, веома је важно узети у обзир и својства попут пропагационих губитака (енг. *path loss*), пропагације свјетлосних таласа и шума. Генерално, IEEE 802.15.7 стандард дефинише три типа физичког слоја:

- PHY I, дизајниран углавном за апликације у вањском окружењу које карактеришу кратки оквири и ниже брзине преноса (11.6 – 266.6 kb/s). Од модулационих

поступака се користе ООК (енг. *On-Off Keying*) и VPPM (енг. *Variable Pulse Position Modulation*). Овај режим рада подржава кодовање Рид-Соломоновим (енг. *Reed-Solomon – RS*) и конволуционим кодовима (енг. *Convolutional Code – CC*).

- РНУ II, дизајниран за апликације како на отвореном, тако и у затвореном простору, а које карактерише већа брзина преноса (1.25 – 96 Mb/s). Овај режим рада такође користи ООК и VPPM, али подржава само RS кодовање.
- РНУ III, дизајниран за апликације са више извора свјетлости, односно фотодетектора, на различитим фреквенцијама, односно бојама. Овај режим рада подразумева кориштење CSK поступка модулације и RS кодовања, са циљем постизања брзине преноса у опсегу од 12 до 96 Mb/s.

Наведена три типа РНУ слоја могу коегзистирати, али не могу заједно функционисати. Сваки систем усклађен са IEEE 802.15.7 мора да имплементира најмање РНУ I или РНУ II режиме рада. Систем који имплементира РНУ III режим, такође мора имплементирати и РНУ II за коегзистенцију. За све РНУ типове је обезбијеђено више оптичких брзина како би се подржала широка класа LED за различите апликације. Детаљне спецификације РНУ I, РНУ II и РНУ III режима рада приказане су у Табелама 2.5, 2.6 и 2.7, респективно [7].

Табела 2.5 – Спецификације РНУ I слоја

Модулациони поступак	RLL кôд	Оптички такт	FEC		Брзина преноса
			Спољни кôд (RS (n, k))	Унутрашњи кôд (CC (k/n))	
ООК	Манчестер	200 kHz	(15, 7)	1/4	11.67 kb/s
			(15, 11)	1/3	24.44 kb/s
			(15, 11)	2/3	48.89 kb/s
			(15, 11)	-	73.30 kb/s
			-	-	100 kb/s
VPPM	4B6B	400 kHz	(15, 2)	-	35.56 kb/s
			(15, 4)	-	71.11 kb/s
			(15, 7)	-	124.40 kb/s
			-	-	266.60 kb/s

Избор оптичке брзине за комуникацију одређује MAC слој током откривања уређаја. ООК и VPPM пружају компромис између брзине преноса и опсега затамњивања. Са циљем да се обезбиједе DC баланс, опоравак такта и ублажавање треперења, РНУ I и РНУ II такође подржавају кодовање са ограниченом дужином рада (енг. *Run-length Limited – RLL*) – технику линијског кодовања која се користи за слање произвољних података преко

комуникационог канала са ограничењима пропусног опсега. Са циљем постизања DC балансирања, PHY I користи Манчестер и 4B6B кодовање, док PHY II користи 8B10B/4B6B кодовање. У PHY III режиму рада, CSK модулација се генерише кориштењем извора свјетлости у три боје, из опсега од седам боја дефинисаних у стандарду [1]. У Табелама 2.5, 2.6 и 2.7 су приказане и брзине преноса које је могуће постићи у сваком од случајева, као и кориштене технике заштитног кодовања (енг. *Forward Error Correction* – FEC).

Табела 2.6 – Спецификације PHY II слоја

Модулациони поступак	RLL код	Оптички такт	FEC (RS (n, k))	Брзина преноса
VPPM	4B6B	3.75 MHz	RS (64, 32)	1.25 Mb/s
			RS (160, 128)	2 Mb/s
		7.5 MHz	RS (64, 32)	2.5 Mb/s
			RS (160, 128)	4 Mb/s
			-	5 Mb/s
OOK	8B10B	15 MHz	RS (64, 32)	6 Mb/s
			RS (160, 128)	9.6 Mb/s
		30 MHz	RS (64, 32)	12 Mb/s
			RS (160, 128)	19.2 Mb/s
		60 MHz	RS (64, 32)	24 Mb/s
			RS (160, 128)	38.4 Mb/s
		120 MHz	RS (64, 32)	48 Mb/s
			RS (160, 128)	76.8 Mb/s
			-	96 Mb/s

Табела 2.7 – Спецификације PHY III слоја

Модулациони поступак	Оптички такт	FEC (RS (n, k))	Брзина преноса
4-CSK	12 MHz	RS (64, 32)	12 Mb/s
8-CSK		RS (64, 32)	18 Mb/s
4-CSK	24 MHz	RS (64, 32)	24 Mb/s
8-CSK		RS (64, 32)	36 Mb/s
16-CSK		RS (64, 32)	48 Mb/s
8-CSK		-	72 Mb/s
16-CSK		-	96 Mb/s

Најзначајније функционалности РНУ слоја су избор модулационог поступка, примјена заштитног кодовања, те употреба механизма затамњивања свјетлости. Остале значајне функционалности укључују избор канала, индикацију квалитета таласне дужине и синхронизацију. Генерално, главне карактеристике комуникације видљивом свјетлости садржане су у физичком слоју. У оквиру академске заједнице и стандардизационих организација постоје константни напори са циљем рјешавања главних проблема везаних за VLC физички слој, посебно у погледу техника модулације и механизма кодовања, као и њиховог утицаја на факторе као што су треперење и затамњивање свјетлости [1].

IEEE 802.15.7 РНУ може да изврши поступак процјене заузетости канала (енг. *Clear Channel Assessment* – CCA) кориштењем неког од три могућа режима:

- CCA режим 1, који подразумева да је енергија E изнад унапријед одређеног прага E_{th} . У овом режиму, CCA пријављује заузет медијум ако детектује било коју вриједност E већу од вриједности прага E_{th} .
- CCA режим 2, који подразумева искључиво ослушкивање носиоца. У овом режиму, CCA пријављује заузети медијум ако детектује сигнал са карактеристикама модулације IEEE 802.15.7 стандарда. Овај сигнал може бити изнад или испод E_{th} .
- CCA режим 3, који подразумева ослушкивање носиоца са вриједности E изнад E_{th} . У овом режиму, пријављује се заузетост медијума ако постоји сигнал са модулационим карактеристикама IEEE 802.15.7 стандарда, и ако је вриједност E изнад E_{th} .

Снагу и/или квалитет примљеног оквира карактеришу мјерења индикације квалитета таласне дужине (енг. *Wavelength Quality Indication* – WQI). Резултат се извјештава MAC подслоју. У уређају који је усклађен са стандардом потребно је најмање седам јединствених вриједности WQI. Имплементација WQI се може извршити кориштењем детектора енергије, процјене односа сигнал-шум или комбинацијом ових метода.

Са циљем постизања синхронизације оптичког такта са долазном поруком, примопредајник користи поље преамбуле у РНУ оквиру. Стандард дефинише један образац брзог закључавања праћен избором од четири узорка зависна од топологије, ради разликовања између различитих РНУ топологија. Преамбула се шаље брзином такта коју бира предајник и коју подржава пријемник, и не укључује било какво заштитно кодовање или линијско кодовање [2].

2.5.1.1 Модулациони поступци

Битна тачка VLC физичког слоја јесте модулација свјетлости, која, за разлику од других врста комуникација, захтијева велике брзине преноса, а да притом не омета свјетлост и не изазове било какву осцилацију свјетлости (треперење) коју може да примијети људско око.

У VLC, модулациони сигнали се могу користити за укључивање LED на жељеним фреквенцијама. Модулације са једним носиоцем подразумевају кориштење RLL секвенци са циљем опоравка такта и података, те избјегавања дугих низова битских јединица или нула који би потенцијално могли да изазову треперење. У наставку је дат кратак преглед најчешће кориштених модулационих техника у VLC, а њихово обједињено поређење је представљено у Табели 2.8.

Табела 2.8 – Упоредни приказ најчешће кориштених модулационих поступака у VLC

Модулациони поступак	Спектрална ефикасност	Енергетска ефикасност	Комплексност система	Значајна карактеристика
OOK	Висока	Ниска	Ниска	Изражена склоност треперењу
PPM	Ниска	Висока	Умјерена	Сложена структура примопредајника
CSK	Умјерена	Ниска	Висока	Захтијева се механизам повратне спреге
PAM	Умјерена	Ниска	Ниска	Нелинеарност у свјетлосној ефикасности LED
OFDM	Висока	Умјерена	Висока	Велика вриједност PAPR која изазива озбиљна изобличења

OOK: Најједноставнији тип модулације у VLC је OOK, детаљно описан и у стандарду IEEE 802.15.7 [7]. То је тип дигиталне амплитудске модулације (енг. *Amplitude Shift Keying* – ASK) и подразумева представљање дигиталних података присуством или одсуством сигнала носиоца. Другим ријечима, присуство носиоца у одређеном трајању представља бинарну јединицу, док његово одсуство у истом трајању представља бинарну нулу. Да би се обавила комуникација у VLC, свјетлост мора бити модулисана, а веома једноставан и лак начин за модулацију свјетла састоји се у укључивању и искључивању LED. У том погледу, OOK модулација је веома прилагодљива концепту VLC, јер ће укључивање и искључивање LED заузврат бити примљено и демодулисано као битска „1“ и „0“, респективно. Због своје једноставности, ова техника модулације је најчешће примијењена у VLC, али са собом носи и недостатке у виду појаве треперења и ограничене брзине преноса података у многим случајевима [1]. Ипак, примјеном OOK у појединим истраживањима постигнута је брзина преноса реда Gb/s [22].

VPPM: VPPM модулациони поступак користи два различита типа модулације: импулсну позициону модулацију (PPM) и импулсну ширинску модулацију (енг. *Pulse Width Modulation* – PWM), и први пут је представљен у стандарду IEEE 802.15.7 [7]. У PPM, ширина и амплитуда импулса су константне, док дигиталну вриједност сигнала даје позиција у којој се налази импулс, према времену. Иако PPM карактерише једноставност имплементације, брзина преноса података је ограничена пошто се за сваки симбол емитује само један импулс, а у поређењу са OOK сложеност система је повећана пошто се захтијева строжа синхронизација битова и симбола на пријемнику [13]. Са друге стране, у PWM, дужина импулса одређује вриједност сигнала, у одређеном временском периоду. У поређењу са OOK модулационим поступком, кориштењем PWM могуће је добити више бита/симбола, метод синхронизације је једноставнији, те је могућа примјена на вишенивовску битску модулацију што омогућава већу брзину преноса података. С обзиром на наведено, VPPM користи PPM да обезбиједи комуникацију, а PWM за подршку контроле затамњивања свјетлости [1].

CSK: У CSK техници модулације, сигнал је модулисан у складу са интензитетом три боје које чине тип LED са више чипова. Ова LED се састоји од три или више LED чипова, обично црвене, зелене и плаве боје. Ове три боје се заједно користе за стварање бијеле свјетлости. С обзиром на то да се CSK модулацијом постиже значајно већа брзина преноса података у односу на OOK и VPPM, IEEE 802.15.7 стандард првенствено предлаже CSK модулацију као рјешење у VLC системима. CSK модулација је заснована на CIE 1931 дијаграму хроматичности [1]. Пренесени бит одговара одређеној боји у CIE 1931 координатама. RGB извори се могу бирати из седам могућих опсега таласних дужина. Изабрани опсези таласних дужина одређују врхове троугла унутар ког се налазе констелационе тачке CSK симбола. Тачка боје за сваки симбол се генерише модулацијом интензитета RGB чипова. Ипак, CSK се не може користити у VLC систему у ком је извор рс-LED, који је један од најчешће кориштених извора свјетлости у систему освјетљења. Такође, CSK захтијева сложенију структуру кола. Опциона повратна петља са пријемника може бити имплементирана за калибрацију боје и избјегавање сметњи од других извора свјетлости [13].

PAM (енг. *Pulse Amplitude Modulation*): PAM је основна модулациона техника коју карактерише велика ефикасност у погледу кориштеног пропусног опсега. Подаци се модулишу у амплитуду импулса сигнала. Технике модулације које користе више нивоа интензитета, попут PAM, подлијежу нелинеарности у свјетлосној ефикасности LED. С обзиром на зависност боје LED емисије од улазне струје и температуре, вишеструки нивои PAM симбола подложни су промјенама температуре боје услед варијације струје [13]. Примјеном PAM модулационе технике, већина енергије модулисаног спектра је концентрисана на нижим фреквенцијама. Стога, повећањем пропусног опсега модулације

изнад тродецибелског пропусног опсега LED, долази до приближно истог губитка снаге без обзира на вриједност фактора стрмине функције преноса (*roll-off* фактор).

OFDM (енг. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*): У VLC системима, OFDM техника модулације је привукла велику пажњу због своје високе брзине преноса података која се остварује кориштењем више ортогоналних подносилаца за истовремени пренос паралелних токова података, те због једноставног поступка еквализације и отпорности на интерсимболску интерференцију (енг. *Inter-Symbol Interference* – ISI). OFDM је спектрално ефикасан модулациони поступак и отпоран је на дисперзију канала. Своју примјену у VLC системима нашло је више варијанти овог модулационог поступка, као што су:

- DC-пристрасни оптички OFDM (енг. *DC-biased Optical OFDM* – DCO-OFDM),
- асиметрично исјечени оптички OFDM (енг. *Asymmetrically Clipped Optical OFDM* – ACO-OFDM),
- импулсно амплитудски модулисани дискретни мултитон (енг. *Pulse-Amplitude-Modulated Discrete Multitone* – PAM-DMT),
- униполарни OFDM (енг. *Unipolar OFDM* – U-OFDM), те
- флип OFDM.

Истраживања показују да је DCO-OFDM поступак енергетски неефикасан због додавања DC компоненте, с обзиром на то да она не носи корисну информацију. Са друге стране, преостали наведени модулациони поступци су спектрално неефикасни у поређењу са DCO-OFDM. Велики проблем код оптичких OFDM сигнала јесте висок однос вршне и просјечне снаге (енг. *Peak-to-Average Power Ratio* – PAPR), што може изазвати озбиљна изобличења услед нелинеарности LED. Надаље, енергетска ефикасност LED лампи се, у поређењу са једноставнијим модулационим поступцима попут ООК, смањује кориштењем оптичких OFDM шема. Пошто је висока енергетска ефикасност једна од значајних предности LED лампи у односу на друге традиционалне расвјетне уређаје, потребан је развој оптичких OFDM шема са малом потрошњом енергије на VLC драјверу како би се постигао баланс између енергетске ефикасности LED лампи и брзине преноса података [23].

Такође, међу модулационим поступцима који могу наћи своју примјену у VLC системима су и [13]:

- PPMPWM (енг. *Pulse-Position-Pulse-Width Modulation*),
- PDSM (енг. *Pulse Dual Slope Modulation*),
- GSSK (енг. *Generalized Space Shift Keying*),
- GCM (енг. *Generalized Color Modulation*),
- CIM (енг. *Color Intensity Modulation*), и
- CAP (енг. *Carrierless Amplitude and Phase Modulation*).

2.5.1.2 Заштитно кодовање

Као што је раније речено, VLC је првенствено намијењен за бежични комуникациони систем кратког домета, стога повећање удаљености између предајника и пријемника може довести до деградације перформанси. Такође, шум је незаобилазна појава у комуникационом каналу која може довести до значајних грешака при преносу информација. У савременим дигиталним комуникационим системима, гдје су високе брзине преноса података и поузданост преноса од суштинског значаја, заштитно кодовање је постало неопходно. Исправљање више грешака обезбјеђује нижу снагу потребну за пренос, као и веће брзине преноса података, што код чини енергетски ефикасним. С друге стране, ако је кодни количник низак, редундантност је већа, што резултује кориштењем већег пропусног опсега. У том сценарију, сложеност процеса декодовања расте експоненцијално у складу са дужином кода, тако да су рачунарски захтјеви за конвенционалне декодере веома високи. VLC кодовање такође има један велики недостатак пропагације грешке, гдје чак и једна грешка у најгорем случају може оштетити цијелу датотеку. Због тога, примјена алгоритма за детекцију грешака је неопходна за VLC систем [24].

Технике кодовања које се могу користити у VLC системима су разне, попут Хеминговог кода, RS кода, LDPC (енг. *Low-Density Parity-Check*) кода или конволуционих кодова. У РНУ I режиму рада, губици дуж путање усљед дугог распона везе и сметњи усљед амбијенталних и вјештачких извора свјетлости захтијевају ефикасније кодовање са комбинацијом конволуционих спољашњих кодова и RS унутрашњих кодова. С друге стране, RS кодови се чешће користе за апликације у унутрашњем простору, дакле у РНУ II и РНУ III режиму рада, пошто су захтјеви за кодовање мање строги [2]. С обзиром на то да се у практичном дијелу овог рада користе Хемингов и RS код, они ће у наставку бити описани.

Хемингови кодови: Да би се могле исправити грешке у примљеној поруци, идеја је да се, умјесто једног, уведе више битова за провјеру, тј. да се изврши провјера парности за неки подскуп битова у кодној ријечи. Хеминг је представио фамилију кодова за детекцију двоструке и исправљање једне грешке. Хеминг је одредио број различитих вриједности синдрома и закључио да број провјера $n-k$ треба да испуњава услов да је $2^{n-k} \geq n+1$, гдје је n укупан број бита у кодованој ријечи, а k број информационих бита. Хемингов код се може користити за кодну ријеч произвољне дужине. Један информациони бит може бити предмет вишеструких провјера парности. Прва провјера парности укључује све бројеве позиција чији је најнижи бит у бинарној нотацији „1“. Пошто је први контролни бит на позицији $2^0=1$, прва провјера парности је на свим наредним непарним позицијама: 3, 5, 7, итд. Сљедећа провјера парности је на свим бројевима позиција чији је сљедећи по тежини бит у бинарној нотацији „1“: 3, 6, 7, 10, 11, итд., док се одговарајући контролни бит уписује на позицију $2^1=2$. Процедура провјере парности се, аналогно томе, понавља за сљедеће позиције бита.

Општи облици Хеминговог кода имају могућност детекције и корекције једне грешке. Стога, ако се у кодној ријечи појави, на примјер, двострука грешка, могуће је доћи до погрешног закључка да је грешка настала на мјесту означеном синдромом и тиме повећати број грешака. Овај проблем се може ријешити додавањем још једног бита за провјеру парности свих битова кодне ријечи. Тај контролни бит се додаје на последње мјесто кодне ријечи. На овај начин се, поред исправљања појединачних грешака, могу детектовати и двоструке грешке [25]. У практичном дијелу рада се за детекцију и исправљање грешака користи Хемингов код (7, 4).

RS кодови: Још једна техника кодовања која је веома ефикасна за откривање и исправљање грешака јесте и RS кодовање. Ови кодови се користе за откривање и исправљање грешака у многим различитим системима, укључујући бежичне, мобилне и сателитске комуникације, дигиталну телевизију и меморијске уређаје за складиштење. Исправљање грешака додаје редувантне информације подацима који се преносе. На страни пријемника користи се RS алгоритам декодовања, који детектује и исправља одређени број грешака које су настале током преноса. RS кодови се заснивају на посебној области математике познатој као Галоа поља, односно коначна поља, чије је основно својство да аритметичке операције над елементима поља увијек имају резултат у пољу.

RS кодови припадају породици блок кодова пошто процес кодовања поруке подразумијева подјелу поруке на подпоруке одређене дужине. На крају сваке подпоруке додају се редувантни бити, који представљају информације о заштити паритета, формирајући тако блок одређене дужине. RS кодови су такође познати као RS (n, k) кодови, гдје n представља број симбола у једном блоку кода, а k је број информационих симбола у том блоку. Ако је m број бита у једном симболу, онда је $2^m - 1$ максималан број симбола у блоку. С обзиром на то да у сваком блоку има $n - k$ паритетних симбола, могуће је исправити највише $(n - k) / 2$ погрешна симбола по блоку [25].

Током преноса може доћи до многих грешака из више разлога. RS декодер обрађује сваки блок кода и покушава да изврши исправку грешке да би повратио оригиналне податке. Број исправљених грешака зависи од карактеристика RS кода који се користи. RS декодер извршава комплетну исправку погрешног симбола, било да је грешка узрокована оштећењем једног или свих бита у њему. Могућност корекције симбола, у ком су сви бити оштећени, значајна је карактеристика и велика предност RS кода. Због тога су RS кодови погодни за откривање и исправљање налетних грешака које се често јављају у бежичним комуникацијама услед фединга. Могућности исправљања грешака и сложеност цјелокупног система за исправљање грешака зависе од вриједности параметара n и k [26]. У практичном дијелу рада се испитује RS (7, 3) код за исправљање грешака, који може исправити до два погрешна симбола у кодној ријечи.

2.5.1.3 Техника затамњивања свјетлости

Под појмом затамњивања свјетлости подразумијева се контрола перципиране освијетљености извора свјетлости према захтјевима корисника. Сијалице у разним стамбеним и пословним локацијама су опремљене пригушивачима са циљем контролисања интензитета свјетлости и обезбјеђивања адекватног свјетла у окружењу. Комуникација видљивим свјетлом мора и даље бити могућа са разумним перформансама, чак и са сијалицама које подржавају функцију затамњивања. У многим примјенама, затамњивање је суштинска карактеристика чија интеграција у VLC системима повећава вриједност система, штеди енергију и олакшава интелигентна рјешења за освјетљење. Затамњивање свјетлости представља унакрсну функцију између PHY и MAC слојева. IEEE 802.15.7 стандард дефинише низ механизма за прилагођавање раније описаних модулација, а са циљем омогућења контроле затамњивања.

LED, у теорији, имају способност затамњивања, али нису компатибилне са свим контролама затамњивања које су дизајниране за традиционалне технологије освјетљења. Постоје два општа приступа затамњивању LED [13]:

- Аналогно затамњивање, које подразумијева да се освијетљеност LED може подесити контролом амплитуде струје, с обзиром на чињеницу да је количина свјетлости коју производи LED директно пропорционална струји која покреће LED. Излаз LED драјвера варира пропорционално контролном напону. Овај метод је познат као континуална редукција струје (енг. *Continuous Current Reduction*). У овом случају, не уводе се нове фреквенције које би представљале потенцијалне изворе електромагнетне интерференције (енг. *Electro-Magnetic Interference* – EMI). Овај метод затамњивања је једноставнији за имплементацију у VLC систему и представља исплативо рјешење.
- Дигитално затамњивање, које подразумијева да дигитално модулисани низ импулса покреће LED на константном нивоу струје. У овој методи затамњивања, просјечан радни циклус представља еквивалентни ниво аналогног затамњивања. Било која модулациона шема која одржава просјечан радни циклус или густину сигнала у одређеном временском периоду може се користити за контролу и затамњивање LED. Предност ове методе затамњивања у односу на аналогну огледа се у постизању прецизне тачности у контролисању LED свјетла, смањењу хроматских помјерања, те повећању ефикасности LED драјвера.

Многе модулационе технике се користе у VLC за извршавање дигиталног затамњивања, међу којима су и VPPM и ООК. Раније је речено да VPPM представља комбинацију PPM и PWM. Техника затамњивања кориштењем PWM не подлијеже помјерању таласне дужине изазване тренутним варијацијама, као што је то случај у техникама затамњивања на принципу амплитудске модулације. У PWM, трајање импулса се користи за контролу струје

извора свјетлости, чиме се подешава ниво затамњења, односно освијетљености. Фреквенција PWM сигнала затамњивања је типично изнад 100 Hz, што значи да људско око не може да види тренутне промјене. Ипак, кориштењем VPPM, при пуној освијетљености не може се пренијети никаква информација. Такође, при ниским нивоима затамњивања, брзина преноса података и перформансе су озбиљно нарушени због ниске енергије бита.

Са друге стране, затамњивање се може постићи редефинисањем нивоа ООК симбола како би имали мањи интензитет. Ипак, промјена просјечног нивоа интензитета преношене свјетлости ризикује појаву хроматског помјераја. Затамњивање се, такође, може постићи и задржавањем истих нивоа интензитета свјетлости уз промјену просјечног фактора режима попуње, што се постиже уметањем времена компензације у симбол модулације. То се постиже тако што се оквир дијели на више мањих оквира, гдје се вријеме помака (енг. *offset*) умеће заједно са пољима за поновну синхронизацију са циљем одржања интегритета оквира. Недостатак примјене ове модулационе технике јете нагли пад брзине преноса података у случају када је ниво затамњивања сувише велики или мали, али је са друге стране спектрална ефикасност већа него у случају примјене VPPM [13].

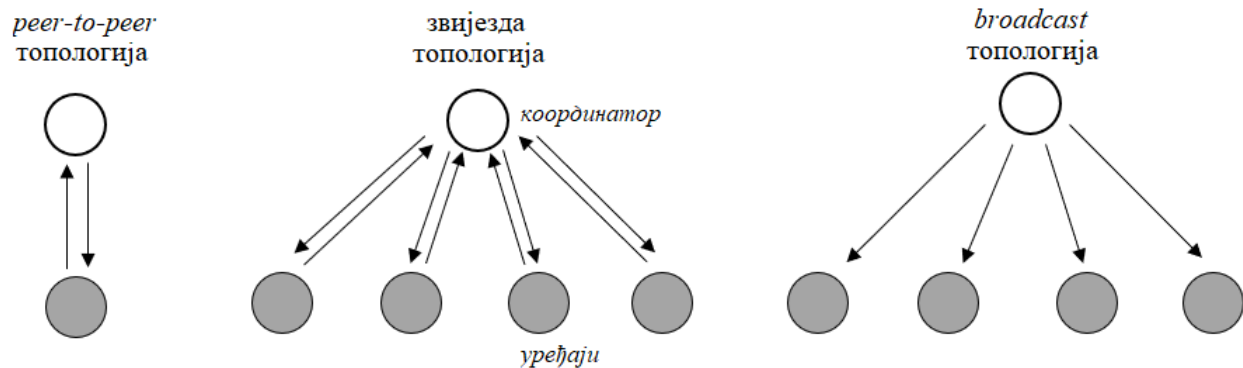
2.5.2 MAC слој

Мрежна топологија, како са логичке тако и са физичке тачке гледишта, дефинише начин организације и дистрибуирања уређаја у рачунарској мрежи, те начин дијелења информација између њих. За VLC системе се, према званичном стандарду, разматрају три класе уређаја: инфраструктурни, мобилни и возила, како је раније приказано у Табели 2.4. У складу с тим, IEEE 802.15.7 дефинише апликације у три MAC топологије [1]:

- *peer-to-peer* топологија, у којој уређај може да комуницира са било којим другим уређајем у својој области покривености. Један од повезаних уређаја мора преузети улогу координатора, која се, на примјер, може додијелити првом уређају који ће комуницирати на каналу.
- звијезда топологија, у којој постоји централни контролер који се зове координатор. Између координатора и сваког уређаја у мрежи се успоставља комуникација. Свака мрежа у звијезда топологији ради независно од других мрежа јер постоји идентификатор повезан са једном звијезда мрежом.
- *broadcast* топологија, у којој један уређај може да шаље информације другима без формирања мреже. Комуникација је у оваквој топологији једносмјерна.

Наведене основне топологије у VLC системима су приказане на Слици 2.5. На основу поменутих топологија, IEEE 802.15.7 стандард дефинише многе технике модулације на физичком слоју, управља приступом физичком слоју, а дефинише и посебне протоколе и функције на слоју везе попут процедуре за покретање и одржавање VLC мреже, процедуре

придруживања мрежи, механизма подршке за освјетљење и затамњивање, механизма подршке за функције боје, механизма за подршку мобилности, те стабилизације боје [2].



Слика 2.5 – Основне мрежне топологије у VLC системима

Многе VLC апликације подразумевају вишеструки приступ или сценарије који подржавају више предајника и пријемника, као на примјер у неком затвореном окружењу гдје више особа може бити повезано на VLC приступну тачку, односно LED сијалицу. Стога, у случају више уређаја повезаних у исто вријеме, неопходно је креирање механизма за контролу приступа медијуму, управљање повезивањем уређаја са приступном тачком и омогућавање мобилности. Највише кориштене технике вишеструког приступа у VLC укључују:

- вишеструки приступ расподјелом времена (енг. *Time Division Multiple Access – TDMA*),
- вишеструки приступ са ослушкивањем носиоца (енг. *Carrier Sense Multiple Access – CSMA*),
- вишеструки приступ на бази просторне расподјеле (енг. *Space Division Multiple Access – SDMA*),
- вишеструки приступ на бази ортогоналне фреквенцијске расподјеле (енг. *Orthogonal Frequency Division Multiple Access – OFDMA*), те
- вишеструки приступ на бази кодног мултиплекса (енг. *Code Division Multiple Access – CDMA*).

У последње вријеме, све чешће су у употреби и новији приступи попут неортогоналног вишеструког приступа (енг. *Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA*).

TDMA: TDMA је традиционална техника вишеструког приступа и функционише тако што се сигнал дијели на више временских непреклапајућих слотова. Различити временски слотови се додјељују различитим корисницима који дијеле исти фреквенцијски канал. Основна карактеристика ове технике јесте да су у једном временском слоту сви ресурси додијељени тренутном кориснику. Употреба TDMA технике је била најзначајнија у почетку ћелијских мрежа, развојем 2G и 3G мрежа, али је ова техника усвојена и за комуникацију путем видљиве свјетлости [1].

CSMA: Два типа CSMA су предложена у IEEE 802.15.7 стандарду. У првом се подразумева да се за CSMA користи недодијељени канал са случајним приступом, с обзиром на то да су сигнали које емитује координатор онемогућени. Стога, уређај прво мора да сачека насумичан временски период, познат као период повлачења (енг. *back-off period*), уколико жели да емитује. Након тога, уређај врши провјеру да ли је канал слободан, те у случају заузетости канала уређај поново чека насумичан период прије него што поново покуша приступити каналу. У другом типу CSMA који је предложен у стандарду, подразумева се да су сигнали координатора омогућени, док је вријеме подијељено на интервале сигнала. Уколико уређај жели да емитује на каналу, прво је потребно да лоцира почетак сљедећег временског слота за повлачење и сачека насумичан период прије него што изврши ССА. У случају процјене неактивности канала, уређај почиње да емитује, док у супротном чека још слотова за повлачење прије него што поново покрене ССА [1].

IEEE 802.15.7 стандард дозвољава опциону употребу структуре супер-оквира (енг. *Super-Frame* – SF) чија је форма дефинисана од стране координатора. Границе SF структуре ограничене су тзв. *beacon* сигналом (енг. *Beacon Signal* – BS), иницираним од стране координатора. BS се користи у мрежама које захтијевају или синхронизацију или подршку за уређаје са малим кашњењем. Мреже које не захтијевају синхронизацију или подржавају уређаје са малим кашњењем не морају користити BS за нормалне преносе, али је он и даље потребан за откривање мреже.

Узимајући у обзир претходно наведено, као и два типа CSMA технике која су предложена IEEE 802.15.7 стандардом, могућа су укупно четири типа механизма за приступ каналу, у зависности од конфигурације мреже. Мрежа која није омогућена за *beacon* сигнале (енг. *Non-Beacon-Enabled Network* – non-BEN) користи механизам случајног приступа каналу без слотова, са или без CSMA/CA. Са друге стране, мрежа са омогућеним *beacon* сигналом (енг. *Beacon-Enabled Network* – BEN) користи механизам случајног приступа каналу са слотовима, са или без CSMA/CA. Опционо, успјешан пријем и валидација оквира података или MAC команде може се потврдити командом за потврду. Оквири потврде се шаљу без употребе механизма случајног приступа [2].

SDMA: SDMA представља технику расподјеле простора и често се предлаже са циљем да се оптимизује кориштење спектра усвајањем карактеристика усмјерености за приступ каналу. Врши се секторизација простора чиме се формирају виртуелни канали у домену просторних углова [27]. У суштини, ова техника подразумева да предајник генерише више сигнала у складу са положајем корисника који су активни. Предност за усвајање ове технике огледа се у чињеници да су, у VLC сценаријима, предајници у великој мјери засновани на усмјерености LED [1].

OFDMA: OFDMA техника представља вишекорисничку верзију OFDM модулационог поступка. Вишеструки приступ се постиже тако што се различитим корисницима додјељују различити подскупови подносилаца. Ово омогућава истовремени пренос мање брзине података од неколико корисника. Ипак, имплементација ове технике у VLC системима са собом носи изазове који се тичу енергетске ефикасности и сложености декодовања.

CDMA: CDMA техника је заснована на преносу у проширеном спектру која користи посебне кодне секвенце за сваког корисника. Те кодне секвенце шире спектар и истовремено редукују спектралну густину снаге сигнала. Примјеном ове технике се остварује велика спектрална ефикасност пошто сви активни корисници истовремено користе све ресурсе система. Пошто сигнали свих корисника заузимају исти опсег фреквенција, они се један према другом понашају као случајан шум. Капацитет система у ком је примијењена CDMA техника није фиксан, па се може сматрати да је он виртуелан, с обзиром на то да је одређен искључиво нивоом прихватљиве сметње која потиче од других учесника у систему [27]. У VLC, ова техника се назива оптички CDMA (енг. *Optical CDMA* – OCDMA), а кодови који се дистрибуирају су ортогонални оптички кодови (енг. *Orthogonal Optical Codes* – OOC). Подаци у временском домену могу бити кодовани кроз укључења и искључења LED. OOC су углавном дугачки, што осигурава оптичку ефикасност, али потенцијално смањује перформансе комуникације [1].

NOMA: Концепт NOMA укључује поступак мултиплексирања у домену напајања (енг. *Power-Domain Multiplexing* – PDM) са циљем обезбјеђивања вишеструког приступа. Сваки корисник може да користи цијели пропусни опсег додјеливањем различитих нивоа снаге на основу услова канала. За разлику од техника ортогоналног вишеструког приступа (енг. *Orthogonal Multiple Access* – OMA) које су углавном неефикасне у погледу кориштења ресурса, NOMA обезбјеђује пуну употребу ресурса временског и фреквенцијског домена током преноса. На страни предајника се користи суперпозиционо кодовање (енг. *Superposition Coding* – SC), док се на страни пријемника користи сукцесивно уклањање сметњи (енг. *Successive Interference Cancellation* – SIC), са циљем исправне детекције сигнала. Поред домена снаге, друго рјешење за NOMA истражује домен кода. NOMA у домену кода подразумијева да корисници дијеле фреквенцијске и временске домене, слично CDMA техници, али у овом случају се користи секвенца ширења која је специфична за корисника [1].

2.6 Изазови и ограничења у примјенама VLC технологије

Обједињујући све оно што је наведено у претходним поглављима, може се рећи да је већина VLC система заснована на IM/DD јер LED емитују некохерентно свјетло. Са циљем уштеде енергије и омогућавања корисницима да имају потпуну контролу над освјетљењем, у VLC системима се користе технике затамњивања свјетлости. У VLC се за комуникацију примјењују разне технике модулације, са једним или више носилаца. Са циљем побољшања квалитета преноса, примјењује се заштитно кодовање. Модулишући, информациони сигнал, који је суперпониран са једносмјерном струјом напајања, покреће LED која је предајник у VLC систему. Емитована свјетлост се преноси до пријемника, у ком се врши накнадно појачање и обрада примљеног сигнала. На *front-end* дијелу пријемника се налази појачавач. Избор пријемника као и типа појачавача, зависи од компромиса између осјетљивости и брзине.

Иако VLC карактеришу многе предности у односу на традиционалне комуникационе системе, и даље постоје бројни изазови које треба ријешити са циљем побољшања квалитета перформанси у VLC систему. Изазови се крећу од проблема везаних за свјетлост (карактеристике LED, LOS, треперење, шум и интерференција), па до изазова везаних за бежичну комуникацију попут *uplink* комуникације и мобилности.

Карактеристике LED: Кључни изазов који ограничава брзину преноса података јесте ограничен пропусни опсег и спор модулациони одзив LED. Комерцијалне *ps-LED* високе освјетљености имају веома мали модулациони пропусни опсег. Многе методе се користе са циљем мање ограничености пропусног опсега LED и VLC система, а неке од њих су филтрирање плаве свјетлости, поступак модулације изван номиналног тродецибелског пропусног опсега, поступак еквилизације на предајнику, односно пријемнику, адаптивна еквилизација, те еквилизација подносилаца.

Такође, приликом модулације треба узети у обзир и нелинеарност LED јер се могу јавити значајна амплитудска изобличења због струјно-напонске (*I-V*) карактеристике LED. Нелинеарност LED има већи утицај на OFDM и узрокује повећање BER и интерференције међу носиоцима (енг. *Inter-Carrier Interference* – ICI). Стога, веома је важно изабрати LED са великим динамичким опсегом и благом стрмином *I-V* карактеристике, те пронаћи оптималну радну тачку. Са циљем потпуног искориштења динамичког опсега LED, користи се метода „исијецања“ сигнала (енг. *signal clipping*), што је најједноставнији начин избјегавања високе вриједности односа вршне и средње снаге (PAPR) [13].

Шум и интерференција: Утицај других извора свјетлости, који дијеле исти опсег таласних дужина, представља значајан извор шума и сметњи и може нарушити квалитет преноса у VLC систему, нарочито у примјенама у спољашњем окружењу. Осим природног

свјетла, вјештачка свјетла такође у великој мјери ометају комуникацију, и чак могу довести пријемник до стања zasiћења. Генерално, шум и сметње су неизбјежни за VLC системе, због природног и вјештачког свјетла. За разлику од жичних комуникација, у комуникацији путем видљиве свјетлости сигнал може да се преноси у складу са усмјереношћу LED, али такође може доћи до појаве преламања и рефлексије сигнала, што значи да ће до пријемника стићи реплике оригиналног сигнала. Проблем простирања сигнала на више путања (енг. *multipath*) је такође фактор који у великој мјери може деградирати перформансе VLC система. За ублажавање утицаја сметњи и шума, нарочито усљед природне свјетлости, користе се оптички филтри, а за ублажавање шума се додатно користе и појачавачи сигнала.

LOS: Већина VLC апликација у унутрашњем окружењу предлаже механизам преноса заснован на линији оптичке видљивости (LOS), чија је главна предност пријем сигнала са већом снагом. Друге конфигурације укључују недиректне LOS механизме и дифузно свјетло, али оне, због губитака сигнала, имају значајна ограничења у погледу брзине преноса података. На интензитет примљеног свјетла у великој мјери утичу угао зрачења и усмјерење предајника, при чему мањи просторни угао доводи до пријема јачег сигнала, а већи угао доводи до слабијег сигнала. Надаље, због саме природе освјетљења које се смањује повећањем растојања, удаљеност преноса је ограничена. Са циљем повећања вриједности односа сигнал-шум (SNR), могуће је користити технологију фокусирања LED свјетла на жељену тачку, што је познато као оптичко усмјеравање снопа (енг. *optical beamforming*). Такође, присуство сјенки може драстично смањити количину свјетлости која стиже до пријемника, па се у том случају свјетлост коју рефлектују препреке може искористити тако да систем ефикасно реагује у периодима блокирања свјетлости.

Треперење: Треперење, велики изазов за VLC које је раније већ описано као негативан ефекат који се јавља приликом комуникације видљивом свјетлости, дефинише се као флукуација у освјетљености коју примјећује људско око, што може изазвати нелагодност и ризик по здравље. Овај проблем је нарочито карактеристичан за VLC примјене у унутрашњем окружењу. Са циљем избегавања ове појаве, потребно је да се свјетлосни таласи модулишу тако да њихова најмања фреквенција буде већа од прага на коме их човјек перципира, а то је око 3 kHz. Постоје два типа треперења, и то су треперење унутар оквира (енг. *intra-frame*), те треперење између оквира (енг. *inter-frame*) које подразумева осцилацију између сусједних преноса. У ООК модулацији, треперење се може избјећи примјеном RLL кодовања. VPPM модулација углавном не изазива треперење између оквира, док CSK модулација може изазвати треперење ако се различита снага примијени на више извора свјетлости. IEEE 802.15.7 стандард, са циљем ублажавања ефекта треперења, предлаже да се, током времена када је LED у стању мировања, освјетљеност одржава на фреквенцији изнад оне коју детектују људи, што је познато као шаблон мировања [1].

Uplink комуникација: VLC комуникациони систем, да би био користан, мора да омогући ефикасан и *uplink* и *downlink* пренос. *Downlink* пренос, односно пренос свјетлости од LED до уређаја, представља једноставнији смјер преноса. Са друге стране, ефикасно слање података од уређаја ка LED, односно *uplink* пренос, са собом носи многе изазове, с обзиром на то да VLC са освјетљењем има карактеристике емитовања са дистрибуираним изворима [13]. Видљива свјетлост је свакако један од приступа за рјешавање проблема *uplink* преноса у VLC архитектури, али је у великој мјери неефикасна за преносиве уређаје мале снаге, а такође може бити неповољна и за људски вид. За успостављање *uplink* преноса могуће је кориштење рјешења и из RF, IR и UV опсега, а користе се и ретро-рефлексивни примопредајници. Ипак, многа рјешења са собом носе и недостатке [1].

Иако употреба RF рјешења за успостављање *uplink* преноса нуди предности у виду тога да на личним уређајима више нису потребни предајници видљиве свјетлости, она се може показати скупом и неефикасном за интеграцију потпуно другачијег скупа примопредајника заједно са примопредајницима оптичког домена. Такође, у сценаријима гдје је нужно минимизовање ЕМИ, употреба RF рјешења није прихватљива. Надаље, иако има мало сметњи и не изазива непријатност људским очима, UV дио спектра се углавном користи за комуникацију на кратким удаљеностима у којима не постоји директна линија оптичке видљивости (енг. *Non-Line of Sight* – NLOS) и у таквим сценаријима постиже већу робусност. Са друге стране, већина VLC система ипак захтијева LOS. Ретро-рефлексивни примопредајник модулише упадну свјетлост и рефлектује је назад као *uplink* везу. Недостатак у том случају је ниска брзина модулације, што доводи до нижих брзина преноса података. С обзиром на то да таласи IR спектра не ометају VLC, те да су IR уређаји прилично јефтини и приступачни, IR се намеће као одрживо рјешење за успостављање ефикасног *uplink* преноса [13].

Мобилност: VLC системи морају подржавати мобилне уређаје, као што је то случај код технологија попут *Wi-Fi*. Веома је битно обезбиједити везу велике брзине на непрекидан начин, унутар подручја покривености система. Дакле, уколико се ради о VLC систему у затвореном окружењу, пријемник мора бити у стању да детектује свјетлосне сигнале са предајника било гдје у просторији. Да би се то постигло, на предајној страни је потребан већи угао емитовања, док је на пријемној страни потребно веће видно поље. Такође, поред тога што је веома битна оријентација пријемника у односу на предајник, VLC се, као што је речено, у великој мјери ослања на LOS, што није случај код RF комуникације. У случају кретања пријемника, SNR вриједност свјетлосног сигнала може значајно да се погорша, чак и у случају да се пријемник и даље налази унутар области покривености свјетлошћу. Стога су, за подршку мобилности корисника и комуникацију без губитака, важни механизми примопредаје (енг. *handover*). У ту сврху се пројектују системи са вишеструким приступним тачкама како би се формирале мреже са интегрисаном примопредајом. Примјери таквих система су системи возила, пошто се у таквим системима већина чворова стално креће.

2.6.1 Поједини сценарији примјене VLC технологије

Спектар примјена VLC је изузетно широк. Апликације у затвореним просторима које су засноване на LED освјетљењу представљају најједноставнији и најчешће кориштен тип примјене. С обзиром на неизбежно усвајање LED сијалица у свијету као примарног извора освјетљења, као и инфраструктуру коју ова врста сијалица нуди за VLC системе, будућност примјене VLC у затвореним просторима је веома обећавајућа. Осим комбиновања са освјетљењем у затвореном простору, VLC се може користити у другим сценаријима и комбиновати са многим другим технологијама, па неке од најчешћих разноврсних примјена подразумевају и системе локализације, подводну комуникацију, комуникацију возила и транспортне системе, те апликације осјетљиве на ЕМИ [1]. Такође, због разних фактора попут законских правила или расподеле фреквенцијских опсега по државама, провајдери мобилних мрежа не могу бити једина подршка за IoT. Стога је имплементација VLC у домену IoT од великог значаја [28].

Позиционирање путем видљиве свјетлости (енг. *Visible Light Positioning – VLP*) подразумева да пријемник врши прикупљање сигнала са свих LED у просторији и рачуна удаљеност од њих, користећи различите алгоритме за утврђивање тачне позиције пријемника. Једна од ових техника јесте мјерење јачине примљеног сигнала (енг. *Received Signal Strength – RSS*). Ипак, сигнал постаје све слабији са већом удаљености између предајника и пријемника, а препреке које блокирају или рефлектују таласе нарушавају RSS и ограничавају тачност ове методе. Друга техника подразумева рачунање времена доласка (енг. *Time of Arrival – TOA*), али поставља строге захтјеве у погледу синхронизације сигнала који се преносе између предајника и пријемника, што посљедично изискује веће трошкове у пројектовању ових система. Трећа и најчешће кориштена техника узима у обзир угао доласка (енг. *Angle of Arrival – AOA*). Ова техника захтијева LOS, што је потребно за комуникацију у VLC системима.

Иако је акустична комуникација најчешћа подводна комуникациона технологија којом се омогућава пренос на велике удаљености, она има своја ограничења у виду ограниченог пропусног опсега и високе потрошње енергије за пренос и пријем. Такође, подложна је утицају сметњи, али и температуре воде, посебно близу њене површине. Надаље, употреба електромагнетних таласа у RF је природно ограничена својствима медијума. Са друге стране, оптичке комуникације обезбјеђују значајно веће брзине преноса уз мању потрошњу енергије, што их чини једном од најбољих опција за подводна окружења. Ипак, домет комуникације је у великој мјери ограничен пошто вода апсорбује оптичке сигнале, који се такође лако распршују због суспендованих честица и планктона. Дакле, када је вода освјетљена снопом свјетлости, дио свјетлости се апсорбује, док се други дио распршује, остављајући преостали сноп свјетлости нетакнутим. Да би се тај проблем превазишао, користе се „паметни“ (напредни) предајници и пријемници који су у стању да поравнају и

подесе видно поље према параметрима попут квалитета воде. IM је модулациони поступак који се најчешће користи у подводном VLC [29].

Употреба VLC у системима возила може бити веома корисна. С обзиром на то да су извори свјетлости на путевима многобројни, и између осталог укључују семафоре, свјетлосне стубове и аутомобилске фарове, имплементација VLC у таквом окружењу постаје мање сложена и релативно јефтина. Чињеница да VLC системи раде на основу LOS такође доприноси једноставности и ефикасности имплементације VLC за системе возила. Комуникација видљивом свјетлости између возила (енг. *Vehicle Visible Light Communication* – V2LC) се састоји од једног или више мобилних чворова, представљених возилима, те од фиксних структура као што су саобраћајна и улична свјетла. И мобилни чворови и фиксне структуре могу бити опремљени предајницима и пријемницима, који раде истовремено, чиме се гради динамичка комуникациона мрежа. Таква мрежа има способност да врши слање информација прикупљених од стране различитих сензора повезаних у возилима и околини. Потешкоће примјене VLC у системима паметног транспорта (енг. *Intelligent Transport System* – ITS) огледају се у томе што пријемник мора бити у стању да прати предајник док је у покрету. Такође, повећање удаљености комуникационе везе и изражен позадински шум такође играју важну улогу. Примјене VLC у оваквим системима подразумевају директну комуникацију између аутомобила, познату као комуникација од возила до возила (енг. *Vehicle to Vehicle* – V2V), и комуникацију између возила и инфраструктуре (енг. *Vehicle to Infrastructure* – V2I). Интеграција VLC у ITS пружа веома корисне могућности у виду упозорења и избјегавања судара, помоћи и упозорења при промјени саобраћајне траке и сл.

С обзиром на то да VLC не изазива ЕМИ и има јако мали утицај на електронске уређаје, може се користити у окружењима осјетљивим на ЕМИ као што су кабине авиона, болнице, па и свемирски бродови. Такође се може користити у опасним окружењима попут петрохемијских постројења, гдје је RF забрањен.

RF технологије су олакшале пренос мултимедијалног садржаја, те се и данас доминантно користе на том пољу. Ипак, многи недостаци RF технологија и предности преноса видљивом свјетлости, представљени у Поглављу 2.2, чине VLC ефикасним рјешењем за пренос мултимедијалног садржаја и, конкретно, аудио сигнала. Многа научна истраживања су спровела тестирања преноса аудио сигнала путем видљиве свјетлости и потврдила многе предности кориштења VLC за такав пренос [30-32]. Аутори у [33] су имплементирали софтверско-хардверски ко-дизајн за пројектовање синхронизације и преноса аудио података, али и текста. Експериментална поставка VLC система постигла је успјешан пренос аудио сигнала црвеном свјетлости на удаљености од 15 cm. Постигнута је брзина преноса 4 Mb/s уз примјену ООК модулационог поступка. Надаље, развојем система за аудио пренос бијелом свјетлости преко VLC везе у затвореном простору, уз примјену

PWM модулационог поступка, постигнут је домет преноса од 5 m у оквиру ког је квалитет аудио сигнала на пријему задовољавајућ [34].

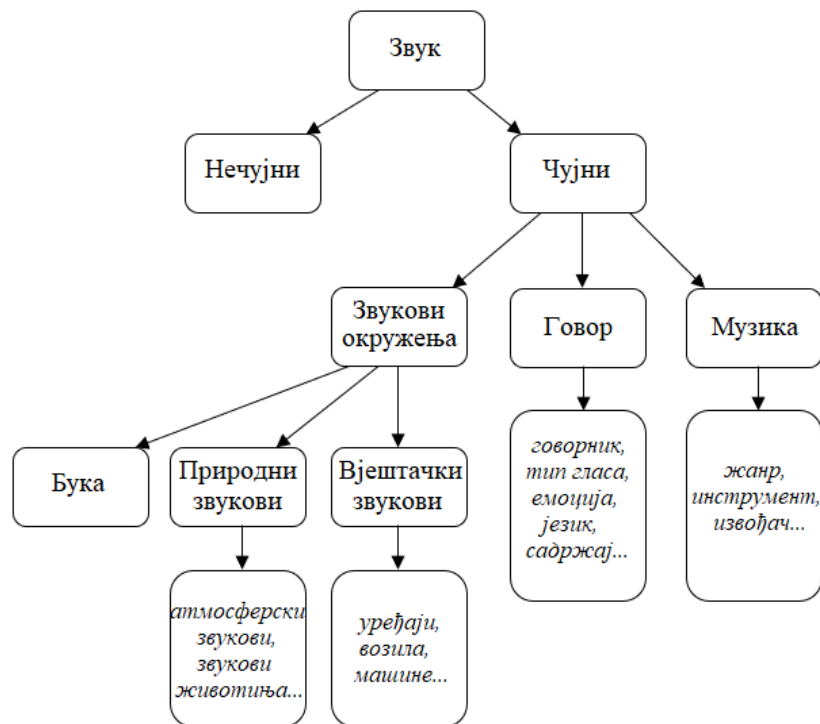
У истраживању [35] из 2020. године посматрао се пренос гласа VLC везом, при чему се врши промјена удаљености, али и угла, између предајника и пријемника. Тестиране су удаљености између 30 и 300 cm, те углови између 0 и 30°. Резултати показују да је пријем сигнала на удаљеностима преко 150 cm у великој мјери нарушен и да се примљени звучни сигнал отежано чује. Такође, повећањем угла постигнути домет преноса се смањује. Надаље, успјешно је тестиран и предложен развој прототипа аудио водича за изложбе у затвореном простору користећи комуникацију путем видљиве свјетлости, што може бити јефтино и еколошки прихватљиво рјешење [36]. Истраживање [37] из 2023. године представља аудио SIMO (енг. *Single-Input Multi-Output*) систем за пренос података од једне тачке до више тачака, са циљем демонстрације функционалности VLC система у аудио преносу кроз модулисано LED свјетло. Систем се састоји од предајне јединице и више пријемних јединица и тестиран је за различита растојања и углове зрачења. Добијени резултати показују да пријемници, који имају широко видно поље, имају и значајно повећање шума који настаје услед амбијенталног свјетла и који у великој мјери утиче на квалитет пријема.

Иако је пренос аудио сигнала VLC везом успјешно демонстриран кроз многа претходна истраживања, до сада ипак, колико је познато, ниједно претходно истраживање није детаљно испитало процјену квалитета звука на пријемној страни VLC везе. Управо ће на томе бити акценат у практичном дијелу овог рада.

3. Методе процјене квалитета аудио сигнала

Звук представља један од основних начина међуљудске комуникације и садржи различите врсте информација о човјековом свакодневном животу. Звук настаје периодичним осциловањем честица еластичне средине, побуђених од извора, који у непосредној околини мијења притисак средства, односно медијума. Поремећај притиска преноси се на сусједне честице медијума и тако се шири у облику лонгитудиналних таласа у гасовима и течностима, односно лонгитудиналних и трансверзалних таласа у чврстим тијелима. У суштини, звук је израз који објашњава шта се чује када звучни таласи пролазе кроз медијум до човјековог уха.

Двије основне класе звукова су нечујни и чујни звукови. Генерално, систем класификације звука подразумијева претходну обраду звука, сегментацију и издвајање обиљежја, праћено различитим техникама класификације. Постоји широк спектар примјена у различитим областима које популаришу класификацију звука као значајно поље истраживања. Ипак, веома је тешко извршити класификацију звука због недостатака у опису семантике садржаја и структурисане организације, стога се развијају многи модели машинског учења за класификацију звука како би се превазишла ова ограничења [38]. Основна класификација звука приказана је на Слици 3.1.



Слика 3.1 – Основна класификација звука

Опсег аудио фреквенција је између 20 Hz и 20 kHz, и звукове из тог опсега људско ухо може да чује. Фреквенције испод 20 Hz и изнад 20 kHz спадају у категорију нечујних фреквенција. Звук са фреквенцијама испод 20 Hz назива се инфразвук, док је звук са фреквенцијама преко 20 kHz ултразвук. Уколико је фреквенција већа од 1 GHz, онда се ради о хиперзвуку. Поред великог фреквенцијског, звук има и велики динамички опсег, и то од 0 до 120 dB. Стандардно се ниво звука у децибелима приказује у односу на референтни износ од 20 μ Pa који начелно одговара прагу чујности, па се то често означава додатком који означава ниво звучног притиска (енг. *Sound Pressure Level* – SPL). Интензитет до 30 dB сматра се шапатом, говор има 60 dB, бука 90 dB, док звук интензитета 120 dB представља границу бола.

Чујни звуци се основном класификацијом даље могу категорисати као говор, музика и звукови окружења. Звукови окружења могу бити природног облика, нпр. атмосферски звукови попут грмљавине, кише и вјетра или звукови које стварају животиње попут лајања паса, цвркутања птица и сл. Са друге стране, вјештачке звукове окружења производе разни уређаји, возила и машине, стога се класификација вјештачког звука углавном користи у даљинском надзору, анализи урбаног звука, кућној аутоматизацији итд. Коначно, трећу групу звукова окружења чини бука.

Аудио сигнал је репрезентација звука, обично користећи промјенљив ниво електричног напона за аналогне сигнале, односно низ бинарних бројева за дигиталне сигнале. Аудио сигнали могу да се синтетишу директно или могу да потичу од претварача као што је микрофон, музички инструмент и сл. Звучници и слушалице претварају електрични аудио сигнал назад у звук. Аудио сигнали се могу карактерисати параметрима као што су пропусни опсег, номинални ниво, ниво снаге у децибелима, те ниво напона. Однос између снаге и напона је одређен импедансом путање сигнала. Путања сигнала може бити једносмјерна или балансирана.

У мултимедијалним и телекомуникационим системима постоји низ фактора који могу утицати на квалитет аудио сигнала, и они у великој мјери зависе од апликације која се користи. Фактори деградације који могу да изазову смањење квалитета аудио сигнала и посљедично повећају потешкоће при слушању укључују изобличења усљед кодовања аудио сигнала, губитак пакета, одсијецање сигнала, као и ехо слушаоца. Изобличења која уносе кодери аудио сигнала увелико варирају у зависности од брзине кодовања. Изобличења која уносе апарати за слушање највише зависе од аутоматске контроле појачања (енг. *Automatic Gain Control* – AGC) и ограничења излаза, при чему само AGC коло уводи непожељна нелинеарна изобличења.

Брзи пораст употребе алгоритама за обраду аудио сигнала у мултимедијалним и телекомуникационим апликацијама намеће потребу за процјеном квалитета аудио сигнала.

Прецизна и поуздана процјена квалитета широкопојасних аудио сигнала је важно разматрање у многим аудио и мултимедијалним мрежама и уређајима, и постаје витална за задовољство крајњег корисника или купца примијењених система за обраду аудио сигнала. У данашње вријеме стриминг медији доминирају интернетом, а поједине статистике показују да више од 60% укупног глобалног мрежног саобраћаја заузимају видео и аудио стриминг [39]. Иако видео стриминг има више ресурса, аудио је такође велики ресурс, стога аудио стриминг преко сервиса попут *Spotify* и *Apple Music* подразумева примјетан аудио интернет капацитета. Дакле, испорука аудио сигнала високог квалитета је од велике важности за крајњег потрошача. Поред стриминга аудио сигнала преко интернета, поуздана процјена квалитета аудио сигнала је од велике важности и у мултимедијалним технологијама попут дигиталног аудио емитовања (енг. *Digital Audio Broadcasting – DAB*), свјетског дигиталног радија (енг. *Digital Radio Mondiale – DRM*), VoIP (енг. *Voice over Internet Protocol*), затим у мобилним телефонима, те у алгоритмима компресије за дигитални аудио.

Анализа објективних параметара попут фактора хармонијских изобличења (енг. *Total Harmonic Distortion – THD*), интермодулационих изобличења (енг. *Intermodulation Distortion – IMD*), SNR, те BER може бити добар индикатор квалитета аудио сигнала, али често не и довољан, с обзиром на то да се наведеним параметрима не моделују психоакустичке карактеристике људског слушног система. Стога се потпуна и вјеродостојна процјена квалитета аудио сигнала врши кориштењем субјективних тестова слушања или кориштењем објективних мјерила квалитета аудио сигнала. Субјективна евалуација укључује поређење оригиналних и обрађених аудио сигнала од стране обимне групе слушалаца од којих се тражи да оцијене квалитет аудио сигнала на унапријед одређеној скали. Највише заступљена директна метода субјективне процјене квалитета аудио сигнала је примјена тзв. MOS (енг. *Mean Opinion Score*) параметра. Иако се тестови слушања сматрају тзв. златним стандардом у погледу процјене квалитета аудио сигнала, они могу бити скупи и дуготрајни. Главни недостатак субјективне евалуације је потреба за обимним, статистички репрезентативним узорком испитаника, односно корисника. Са друге стране, објективна евалуација подразумева математичко поређење оригиналних и обрађених аудио сигнала. Објективне методе квантификују квалитет одређивањем сличности између оригиналног и пријемног сигнала, често сложенем анализом у временском и фреквенцијском домену. Јасно, да би објективна метода била валидна, она треба да добро корелише са субјективним тестовима слушања, и из тог разлога су многа истраживања била усмјерена на развој објективних метода које су моделовале различите аспекте слушног система. Стандардизована објективна метода за процјену квалитета аудио сигнала је PEAQ (енг. *Perceptual Evaluation of Audio Quality*), док се посебно за говор користе многе методе међу којима су PESQ (енг. *Perceptual Evaluation of Speech Quality*), POLQA (енг. *Perceptual Objective Listening Quality Analysis*) и ViSQOL (енг. *Virtual Speech Quality Objective Listener*).

3.1 MOS

Субјективна процјена квалитета аудио сигнала врши се путем тестова, гдје се од обимне групе слушаца тражи оцјена општег квалитета датог тестног аудио сигнала. Ови субјективни тестови су стандардизовани у ITU-T P.800.1 препоруци [40]. Најновија верзија стандарда објављена је у јулу 2016. године. Највише кориштена директна метода субјективне процјене квалитета аудио сигнала која је описана у овој норми јесте оцјена апсолутне категорије (енг. *Absolute Category Rating* – ACR). У овој методи слушаоци оцјењују квалитет тестног аудио сигнала користећи петостепену нумеричку скалу, приказану у Табели 3.1. Измјерени квалитет тест сигнала добија се усредњавањем оцјене добијене од свих слушаца. Ова просјечна оцјена се обично назива средња оцјена мишљења, односно MOS [41].

Табела 3.1 – MOS ACR скала

Оцјена	Квалитет аудио сигнала	Ниво изобличења
5	Одличан	Непримјетно
4	Добар	Само осјетно, али не и непријатно
3	Задовољавајућ	Осјетно и помало непријатно
2	Слаб	Изражено, непријатно, али не и неприхватљиво
1	Лош	Веома изражено, непријатно и неприхватљиво

MOS тест се спроводи у двије фазе: обука и процјена. У фази обуке, слушаоци чују скуп референтних сигнала који илуструју високе (одличне), ниске (лоше) и средње категорије просуђивања. Ова фаза, позната и као „фаза сидрења“ (енг. *anchoring phase*), веома је важна јер је потребна да би се изједначио субјективни распон оцјена квалитета свих слушаца. Стандардни скуп референтних сигнала треба да се користи и опише када се извјештава о MOS резултатима. У фази процјене, слушаоци слушају тестни аудио сигнал и оцјењују квалитет сигнала на скали представљеној у Табели 3.1. У ITU-R BS.562-3 стандарду представљене су смјернице и препоруке за примјену MOS теста, које, између осталог, укључују избор групе испитаника за слушање, процедуру и трајање теста, те избор уређаја за репродукцију. Стандард је замијењен ITU-R BS.1284-2 стандардом из 2019. године, у ком су представљене генералне методе за субјективну процјену квалитета звука [42].

Друге методе описане у препоруци су оцјена категорије деградације (енг. *Degradation Category Rating* – DCR), односно DMOS (енг. *Degradation MOS*), те упоредна оцјена

категорије (енг. *Comparative Category Rating* – CCR), односно CMOS (енг. *Comparative MOS*). Ова два теста користе референтну и модификовану верзију сваког узорка аудио сигнала. Тестови се разликују по редослиједу представљања сигнала. Деградирани сигнал у DCR методи одмах слиједи оригиналну верзију, док је у CCR редослијед насумичан. Такође, са циљем поређења квалитета другог узорка аудио сигнала у односу на први, ова два теста користе различите дискретне скале, са различитим бројем излазних нивоа. Дискретне скале за DCR и CCR методе приказане су у Табелама 3.2 и 3.3, респективно.

Табела 3.2 – MOS DCR скала

Оцјена	Деградација
5	Неосјетна
4	Осјетна, али не и непријатна
3	Дјелимично изражена и непријатна
2	Изражена и непријатна
1	Изражена и веома непријатна

Табела 3.3 – MOS CCR скала

Оцјена	Квалитет тестног аудио сигнала у поређењу са референтним
3	Много бољи
2	Бољи
1	За нијансу бољи
0	Приближно исти
-1	За нијансу лошији
-2	Лошији
-3	Знатно лошији

Употреба MOS за процјену квалитета аудио сигнала може бити у доменима гдје су субјективно људско искуство и мишљење од користи, као што су статичка компресија слике (нпр. JPG, GIF), аудио кодери (нпр. MP3, Vorbis, AAC, Opus), те видео кодери (нпр. H.264, VP8). Такође се веома често користи у стриминг сесијама гдје мрежни ефекти могу деградирати квалитет комуникације. Иако је људско учешће далеко најефикаснији, није увијек и најпрактичнији начин да се постигне MOS унутар мреже пристојне величине, стога се тежи примјени различитих алгоритама за објективну процјену квалитета аудио сигнала.

3.2 PEAQ

Стандард за процјену квалитета звука је PEAQ и представљен је као препорука ITU-R BS.1387. Првобитна верзија стандарда датира из 1998. године, док је посљедња верзија објављена у мају 2023. године и она је тренутно у употреби [43]. PEAQ се често користи у развоју и тестирању мултимедијалних уређаја, кодера и мрежа. Такође, може се користити са комбинацијом других алгоритама за процјену квалитета у обезбјеђивању ефективне укупне оцјене система, нарочито у мултимедијалној индустрији. Тачност PEAQ алгорита у процјени квалитета уређаја или система за слушање говора, музике и других сложених звукова, од велике је важности за крајњег корисника, посебно код веома напредних аудио система. Постоје двије верзије PEAQ алгорита. Основна верзија се користи у апликацијама гдје је од највеће важности рачунарска ефикасност. Са друге стране, напредна верзија се користи у апликацијама гдје је тачност од највеће важности, с обзиром на то да је перцептивно прецизнија од основне верзије. Ипак, иако прецизнија, напредна верзија је четири пута захтјевнија за рачунар. Основна верзија има само један периферни модел уха, односно модел уха заснован на брзој Фуријеовој трансформацији (енг. *Fast Fourier Transform* – FFT). Напредна верзија има два периферна модела уха, гдје се поред модела уха заснованог на FFT користи и модел уха заснован на банци филтара. Основна верзија производи 11 излазних варијабли модела (енг. *Model Output Variable* – MOV), док се 5 MOV производи напредном верзијом. MOV су излазне карактеристике засноване на гласноћи, модулацији, маскирању и прилагођавању, линеарној дисторзији и пропусном опсегу. Генерално се израчунавају као просједи ових параметара, узети током трајања тестних и референтних сигнала. MOV представљају улазе у неуронску мрежу која је обучена да их мапира у један резултат који представља укупан степен разлике (енг. *Overall Difference Grade* – ODG). ODG резултат представља очекивани перцептивни квалитет деградираног сигнала ако су кориштени људски субјекти [44]. ODG резултат може да се креће од 0 до -4. Комплетна нумеричка скала са ODG резултатима приказана је у Табели 3.4.

Табела 3.4 – PEAQ ODG скала и одговарајућа ITU-R BS.1387 оцјена

Квалитет аудио сигнала	Ниво изобличења	ODG резултат	ITU-R BS.1387 оцјена
Одличан	Непримјетно	0	5
Добар	Само осјетно, али не и непријатно	-1	4
Задовољавајућ	Осјетно и помало непријатно	-2	3
Слаб	Изражено, непријатно, али не и неприхватљиво	-3	2
Лош	Веома изражено, непријатно и неприхватљиво	-4	1

Од велике је важности чињеница да је PEAQ алгоритам дизајниран само да оцјењује сигнале са изузетно малим оштећењима. Блок дијаграм PEAQ алгоритма који укључује оба психоакустичка модела која се користе у алгоритму приказан је на Слици 3.2.



Слика 3.2 – Блок дијаграм PEAQ алгоритма

Модел уха заснован на FFT користи се у обје верзије PEAQ алгоритма и ради у фреквенцијском домену. Када ниво репродукције није познат, као ниво звучног притиска претпоставља се ниво слушања од 92 dB. Нормалан говор је око 60 dB SPL, гласан говор је око 70 dB SPL, док је гласна рок музика приближно 100 dB SPL, стога је 92 dB SPL разуман средњи ниво звучног притиска без оштећења слуха и близу је динамичком опсегу тестних података 16-битног PCM (енг. *Pulse Code Modulation*) формата. Сваки FFT оквир садржи 2048 одмјерака, што за аудио датотеке са фреквенцијом одмјеравања од 48 kHz одговара дужини оквира од приближно 43 ms. Преклапање од 50% се користи да би се добио помјерај оквира (енг. *frame shift*) од приближно 21.5 ms. Величина FFT се користи у накнадној обради.

У спољашњем и средњем уху се јавља ефекат резонансе и филтрирања док се звучни таласи претварају у механичке вибрације на бубној опни. Три ситне кости, чекић, наковањ и узенгија, дјелују као трансформатор између спољашњег уха испуњеног ваздухом и унутрашњег уха испуњеног течностима. Ово је у суштини прилагођавање импедансе које обезбјеђује минималан губитак енергије путем рефлексије. PEAQ алгоритам покушава да моделује карактеристике ефекта спољашњег и средњег уха на аудио сигнале, укључујући допринос унутрашњег шума у уху.

Фреквенцијска скала која се користи у PEAQ алгоритму се креће од 80 Hz до 18 kHz. У оквиру овог опсега, у основној верзији алгоритма се користи 109 критичних фреквенцијских опсега, док се у напредној верзији алгоритма користи њих 55. FFT фреквенцијске компоненте груписане су у критичне фреквенцијске опсеге као што се дешава у људском слушном систему. Енергија FFT компоненти унутар сваког критичног опсега се сабира како би се добила по једна енергетска вриједност за сваки опсег. Сљедећи корак је додавање фреквенцијски зависног помака сваком критичном опсегу. Помак, у суштини, представља унутрашњи шум генерисан унутар људског уха. Унутрашњи шум производи континуирани праг маскирања, који се још назива и „праг у тишини“ (енг. *threshold in quiet*). Маскирање, односно ширење фреквенције, врши се независно за сваки критични опсег. С обзиром на то да маскирање уназад обично траје од 5 до 10 ms, а PEAQ оквири имају помјерај од приближно 21.5 ms, оно бива безначајно у смислу укупних перформанси. Стога се у овом моделу користи само маскирање унапријед, које је моделовано као једноставан нископропусни филтар првог реда [44].

Модел уха заснован на банци филтара се користи у напредној верзији PEAQ алгоритма. У овом моделу, обрада се врши у временском домену, што је разлика у односу на модел уха заснован на FFT. Модел уха заснован на банци филтара пружа прецизније моделовање људског уха јер користи финију временску резолуцију, стога је могуће моделовање маскирања уназад, док се такође задржава временска структура сигнала. Као и код модела уха заснованог на FFT, када ниво репродукције није познат претпоставља се

ниво слушања од 92 dB. Референтни и деградирани сигнали се обрађују појединачно. Различити пододмјерци су имплементирани са циљем поједностављења рачунских процеса у различитим фазама обраде.

Филтарском банком која садржи подједнако распоређене критичне опсеге врши се разлагање сигнала. Банка филтара има 40 филтара са подједнако распоређеним централним фреквенцијама у опсегу од 50 Hz до 18 kHz. Сваки критични опсег састоји се од два филтра са једнаким фреквенцијским одзивом од којих један има фазни помак од 90°. Анвелопе њихових импулсних одзива имају облик квадрата синусне функције. Након банке филтара, слједећи дио алгоритма моделује ефекат филтрирања спољашњег и средњег уха које се ради на исти начин као код модела уха заснованог на FFT. Симултано маскирање, односно ширење фреквенције, такође је моделовано као у моделу уха заснованом на FFT. Прије временског маскирања се врши рачунање тренутне енергије излаза сваке групе филтара. Док је временско маскирање унапријед имплементирано у оба модела, маскирање уназад је имплементирано само у моделу периферног уха заснованом на банци филтара, у напредној верзији PEAQ алгоритма. Филтар са коначним импулсним одзивом, са 12 коефицијената, користи се за моделовање временског маскирања уназад [44].

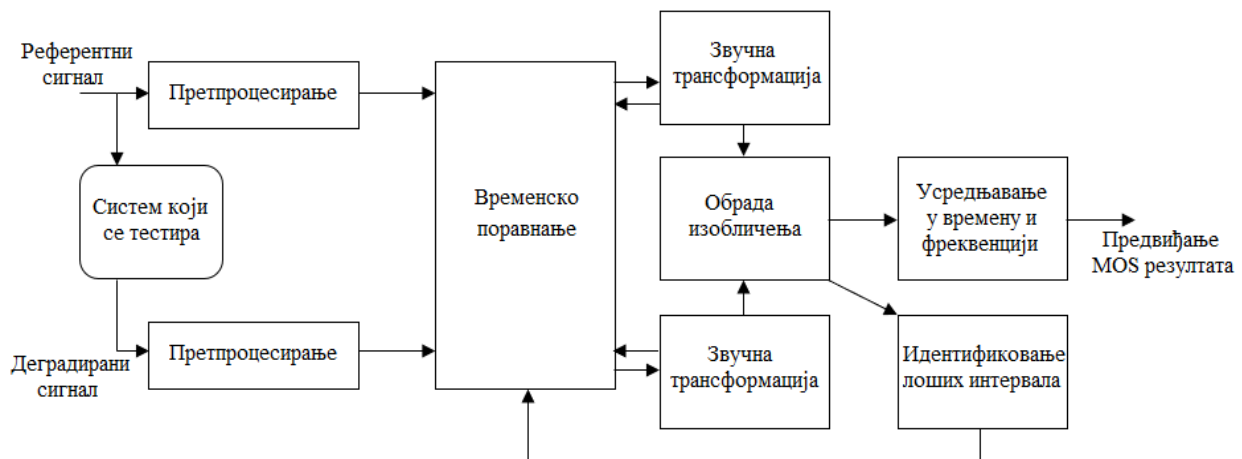
3.3 PESQ

Модел перцептивне евалуације квалитета говора, односно PESQ, стандардизован је као ITU-T P.862 препорука [45]. Верзија стандарда која је у употреби објављена је 2001. године. PESQ може предвидјети субјективни квалитет говора са добром корелацијом под широким спектром услова, који укључују изобличења усљед кодовања, грешке, шум, филтрирање и промјенљиво кашњење. У PESQ моделу, оригинални и деградирани сигнали се мапирају у интерну репрезентацију користећи перцептивни модел. Когнитивни модел користи разлику у овој репрезентацији да би предвидио перципирани квалитет говора у деградираном сигналу. Опажени квалитет слушања изражен је као MOS. Већина субјективних експеримената који се користе у развоју PESQ користи ACR нумеричку скалу [46].

Блок дијаграм PESQ алгоритма приказан је на Слици 3.3. Структура PESQ алгоритма подразумева модел који почиње тако што се деградирани и референтни сигнали појединачно усклађују са нивоом слушања, те се филтрирају улазним филтром чија је преносна карактеристика усклађена са пријемним уређајем као што је нпр. телефонска слушалица. Након тога, два сигнала су временски усклађена како би се компензовала мала временска помјерања до којих може доћи у VoIP мрежама, а која се јављају усљед кашњења, подрхтавања (енг. *jitter*) и кодовања. Да би се урачунала изобличења која слушалац примјећује, модел врши звучну трансформацију из временског у фреквенцијски домен, са

циљем добијања спектра гласноће. Апсолутна разлика између деградираног и оригиналног спектра гласноће користи се као мјера грешке у сљедећој фази PESQ израчунавања [47].

Позитивне и негативне разлике у гласноћи различито утичу на перципирани квалитет. Позитивна разлика указује да је компонента, као што је шум, додата спектру, док негативна разлика указује да је спектрална компонента изостављена или јако ослабљена. У поређењу са адитивним компонентама, изостављене компоненте нису тако лако уочљиве због ефекта маскирања, што доводи до мање неприкладног облика изобличења. Сходно томе, различите тежине се примјењују на позитивне и негативне разлике. Разлике између спектра гласноће се рачунају и усредњавају у времену и фреквенцији и мапирају у предвиђање субјективног MOS резултата. Тако се, након анализе, генерише MOS-LQO (енг. *MOS-Listening Quality Objective*) оцјена [46].



Слика 3.3 – Блок дијаграм PESQ алгоритма

PESQ метода је погодна за телефонске сигнале, чији је опсег фреквенција од 300 Hz до 3.4 kHz. Широкопојасна PESQ верзија (енг. *Wideband PESQ – W-PESQ*) дефинисана је у препоруци ITU-T P.862.2, гдје се PESQ улазни филтар замјењује другим филтром са ширим пропусним опсегом, и то од 50 Hz до 7 kHz. Посљедња верзија тог стандарда која је у употреби објављена је 2007. године [48]. PESQ се може поуздано користити за предвиђање субјективног квалитета говора чак и у ситуацијама када постоје грешке у каналу преноса, губици пакета или различита кашњења у сигналу. Такође, PESQ мјера не пружа свеобухватну процјену квалитета телефонског преноса, с обзиром на то да само одражава ефекте једносмјерног говора или изобличења усљед шума које примјећује крајњи корисник. Ефекти као што су губитак гласноће, бочни тон и ехо говорника се не одражавају на PESQ резултате [47].

3.4 POLQA

POLQA алгоритам је стандардизован у ITU P.863 препоруци [49]. Верзија стандарда која је тренутно у употреби објављена је 2018. године. POLQA алгоритам се бави бројним ограничењима PESQ алгоритма, као и побољшањем укупне корелације са субјективним MOS резултатима. POLQA такође имплементира идеализацију референтног сигнала тако што ствара референтни сигнал који тежи перцептивно истакнутим подацима прије него што их упореди са деградираним сигналом. Алгоритам омогућава предвиђање укупног квалитета говора у два режима: ускопојасном, у опсегу од 300 Hz до 3.4 kHz, и суперширокопојасном, у опсегу од 50 Hz до 14 kHz. Улази у алгоритам су два таласна облика представљена са два вектора података који садрже 16-битне РСМ одмјерке. Први вектор садржи одмјерке неискривљеног референтног сигнала, док други вектор садржи одмјерке деградираног сигнала. POLQA алгоритам се састоји од блока временског поравнања, естиматора брзине одмјеравања претварача брзине одмјеравања, који се користи за компензацију разлика у брзини одмјеравања улазних сигнала, те од модела језгра који врши прорачун MOS.

У првом кораку се одређује кашњење између два улазна сигнала и процјењује се брзина одмјеравања два сигнала, једног у односу на други. Процјена брзине одмјеравања је заснована на информацијама о кашњењу које је израчунато временским поравнањем. Ако се брзина одмјеравања разликује за више од 1%, сигнал са већом брзином одмјеравања се поново одмјерава са мањом брзином одмјеравања. Послије сваког корака, резултати се чувају заједно са просјечним индикатором поузданости кашњења који је мјера за квалитет процјене кашњења. Бира се резултат из корака поновног одмјеравања који је дао највећу укупну поузданост. Када се утврди тачно кашњење и компензују разлике у брзини одмјеравања, сигнали и информације о кашњењу се преносе на основни модел који израчунава перцептивност, као и ниво изобличења, те их мапира на MOS скалу. Општи блок дијаграм POLQA алгоритма, као и блок дијаграм блока перцептивног модела који рачуна индикаторе изобличења, приказани су у [50]. За разлику од осталих објективних метода, изворни код за POLQA алгоритам није јавно доступан. Кориштење POLQA извршне датотеке у истраживачке сврхе је једино могуће под уговором о повјерљивости података, уз евентуалну новчану доплату.

3.5 ViSQOL

ViSQOL је објективни модел људске осјетљивости на деградације у квалитету говора. Модел пореди референтни сигнал са деградираним тестним сигналом кориштењем спектрално-временске мјере сличности између њих. Без обзира на то да ли је квалитет

говорног сигнала деградиран услед деградације канала за пренос или амбијенталне буке, ViSQOL има за циљ да предвиди укупан квалитет искуства крајњег корисника. Резултат је предвиђање квалитета говора који перципира просјечна особа. Модел је обучен и тестиран са ускопојасним говорним сигналом који је подложен великим деградацијама. Блок дијаграм ViSQOL алгоритма приказан је у [50]. Модел има пет главних фаза обраде:

- претпроцесирање,
- временско поравнање,
- предвиђање изобличења,
- поређење сличности, и
- пост-процесирање.

Фаза претпроцесирања подразумијева да се тестни сигнал скалира тако да одговара нивоу звучног притиска референтног сигнала. Спектрограми референтних и тест сигнала креирани су кориштењем 16 фреквенцијских опсега између 150 Hz и 3.4 kHz за ускопојасно тестирање. Ако је говорни сигнал широкопојасни, користи се још пет фреквенцијских опсега до 8 kHz. Хемингов прозор са 256 одмјерака за говорни сигнал са фреквенцијом одмјеравања од 8 kHz користи се да би се одржала временска конзистентност резолуције оквира. Ако је фреквенција одмјеравања сигнала 16 kHz, тада се користи Хемингов прозор од 512 одмјерака. Тестни спектрограми се доводе до минималне вриједности у референтном спектрограму како би се осигурало да негативне вриједности у тестном спектрограму не деградирају резултате сличности у случају губитка пакета. Спектрограми се користе као улаз за другу фазу обраде модела [46].

У фази временског поравнања се врши сегментација референтног сигнала у тзв. печеве (енг. *patches*) ради поређења. Сваки печ је дуг 30 оквира, односно 480 ms, са 16 или 21 критичним фреквенцијским опсегом. Једноставан детектор гласовне активности се користи на референтном сигналу за приближно сегментирање сигнала у активне печеве [50]. Мјера индекса сличности неурограма (енг. *Neurogram Similarity Index Measure – NSIM*) се користи за поравнавање и мјерење сличности између референтних и тестних печева спектрограма, а има за циљ да обезбиједи да су печеви исправно поравнати, чак и у случајевима са високим нивоом позадинског шума. Затим, сваки референтни печ је поравнат са одговарајућом области тестног спектрограма. NSIM је осјетљивији на изобличење времена од самог слушаоца. Да би се превазишао овај проблем, ViSQOL модел временски изобличава печеве спектрограма, што резултује стварањем алтернативних печева који су од 1 до 5% краћи или дужи од оригиналних. Затим се, користећи NSIM, прави поређење и референтних и изобличених референтних печева са тестним печевима. Ако изобличени печ има већи резултат сличности, тај резултат се користи за печ. Приликом рачунања укупне сличности, средњи NSIM резултат за печеве се враћа као процјена сличности сигнала. У посљедњој фази обраде се добијена процјена сличности сигнала, кориштењем полинома трећег реда, трансформише у MOS-LQO резултат [46].

4. Експериментална поставка и анализа перформанси у симулацији

За пренос аудио сигнала VLC комуникационом везом, у симулационом дијелу истраживања кориштена је рачунарска платформа за симулације VLC система, представљена и детаљно описана у [51]. Кодови предложене рачунарске платформе су написани у програмском пакету MATLAB, и могу се наћи у [52]. У иницијалном симулационом експерименту, кориштењем одговарајућих метода представљених у Глави 3, извршена је процјена квалитета говорног сигнала који се преноси у VLC систему [46]. Анализира се допринос примјене заштитног кодовања на квалитет сигнала који се преноси. Након тога, кориштењем PEAQ методе извршена је процјена квалитета и осталих типова аудио сигнала, раније представљених у основној класификацији звука на Слици 3.1.

Како је LED компонента која због своје нелинеарне карактеристике обично генерише највећа изобличења у VLC систему, у кориштеној платформи за симулације VLC система главни нагласак је на моделовању њеног фреквенцијског одзива, нелинеарне I - V карактеристике, те нелинеарне конверзије тренутне електричне снаге у тренутни интензитет свјетлости. Користи се 5 mm округла бијела LED ($T-1\ 3/4$) 334-15/T1C1-4WYA [53]. Нагласак је и на моделовању оптичког канала и фотодиоде као пријемника. Модел пријемника је представљен само својим појачањем, што заправо представља фактор конверзије фотодиоде. Ради једноставности, сматра се да је одзив фотодиоде равномјеран у цијелом видљивом спектру.

У истраживању [51] се користи 4-РАМ техника модулације уз примјену Грејевог кода који, с обзиром на особину да се двије узастопне вриједности разликују само у једном биту, олакшава исправљање грешака које су се догодиле у преносу. Како је раније речено у Тачки 2.5.1.1, РАМ техника модулације гарантује велику ефикасност у погледу кориштеног пропусног опсега. Ипак, вишеструки нивои РАМ симбола подложни су промјенама температуре боје услед варијације струје. Са циљем дјелимичног поједностављења моделованог VLC система, у овом истраживању се користи двонивовски РАМ модулациони поступак, стога примјена Грејевог кода у овом контексту нема сврху.

Са даљим циљем рјешавања проблема ниског пропусног опсега, али и умањења недостатака у виду појаве нелинеарних ефеката, утицаја ISI, те утицаја сјенки услед препрека приликом преноса, користи се адаптивна еквализација одлучивања са повратном спрегом (енг. *Decision-Feedback Equalization* – DFE). Основна идеја DFE јесте кориштење претходних симбола како би се побољшале перформансе детекције тренутног симбола. DFE се састоји од филтра „унапријед“ (енг. *Feedforward* – FF), филтра са повратном

информацијом (енг. *Feedback* – FB) и од уређаја за одлучивање који уводи нелинеарност у процес еквализације. FF и FB филтри могу бити са линеарним параметрима, а могу бити и нелинеарни филтри.

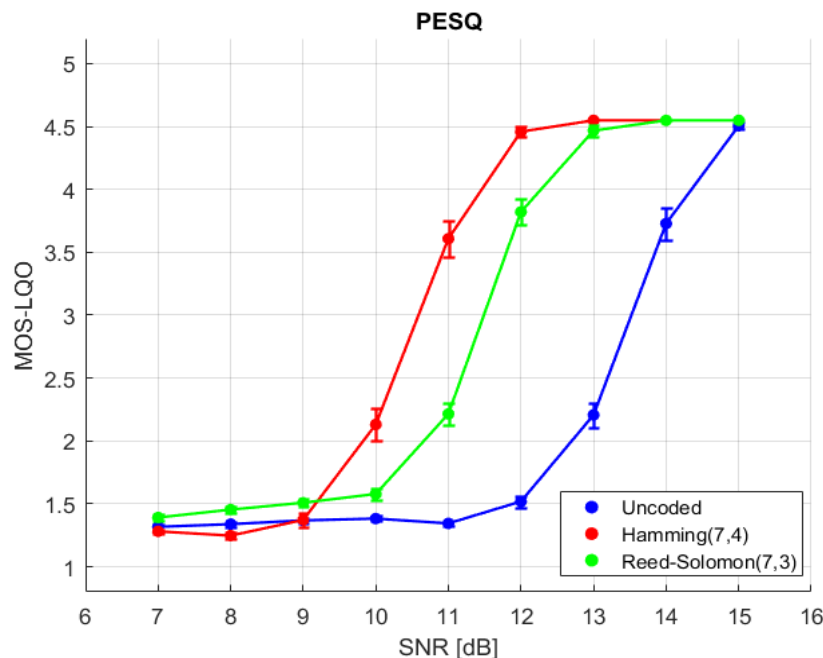
У моделованом VLC систему LED и фотодиода се третирају као савршено поравнате, а растојање између њих је подешено на 10 cm и оно се не мијења током експеримента. Фактор кољена (енг. *knee factor*) има вриједност 2, што индукује висок степен нелинеарности у електрично-оптичкој конверзији. Да би радна тачка била у средини линеарног дијела LED *I-V* криве, вриједност DC компоненте је подешена на 3.25 V. Вриједност индекса модулације се може подесити на 0.05, 0.075 или 0.1. За ову симулацију се користи најмања вриједност индекса модулације од 0.05. Користи се опсег вриједности параметра SNR од 7 до 15 dB, који је изабран тако да се у оквиру њега добијена оцјена квалитета примљеног аудио сигнала креће од минималне до максималне. Са циљем добијања што поузданијих резултата, изводи се десет *Monte Carlo* петљи. Главни параметри који се користе за моделовање VLC система и њихове одговарајуће вриједности су наведени у Табели 4.1.

Табела 4.1 – Главни параметри коришћени за моделовање VLC система

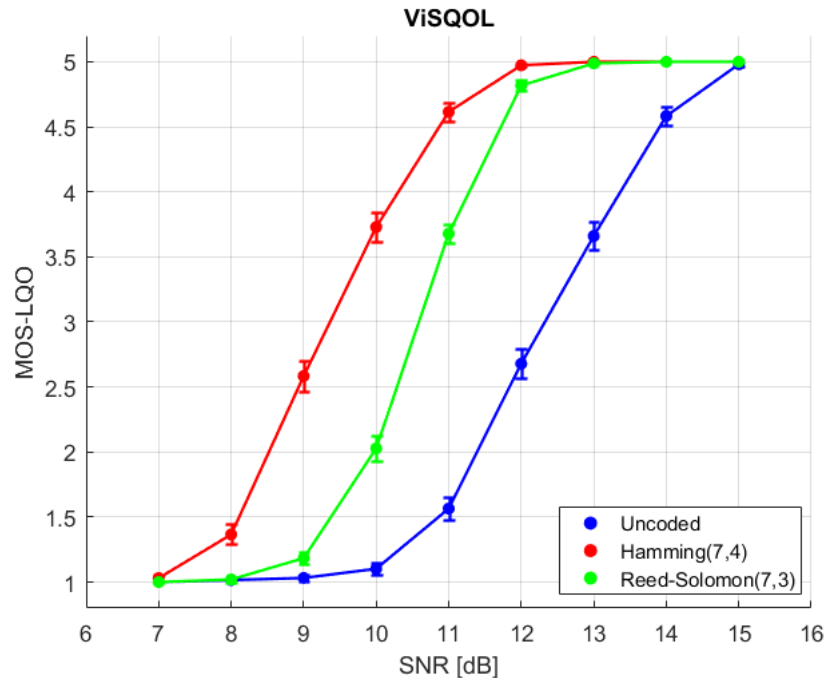
Параметри LED	
Минимални напон LED	3 V
Максимални напон LED	3.6 V
Минимална јачина струје LED	4 mA
Максимална јачина струје LED	30 mA
Минимални напон за проток струје	2.6 V
Ширина снопа	15°
Параметри фотодиоде	
Област детекције	1 cm ²
Одзив фотодиоде	0.5
FOV	15°
Параметри преноса	
Удаљеност између LED и фотодиоде	10 cm
Фактор кољена	2
DC компонента	3.25 V
Индекс модулације	0.05
Дужина FB филтра	12
Дужина FF филтра	12
SNR	7 – 15 dB
Број <i>Monte Carlo</i> петљи	10

4.1 Процјена квалитета говорног сигнала

У овом дијелу истраживања, кориштењем PESQ и ViSQOL објективних модела квалитета говора, оцјењује се квалитет говорног сигнала који се преноси у моделованом VLC систему. Користи се база података снимљених говора, представљена у [54]. У бази података је десет говорника, од којих пет мушкараца и пет жена, изговарало педесет различитих ријечи нормалним гласом, а потом и шапатам. Свака ријеч је изговорена десет пута. Конкретно, у овом експерименту је кориштено шест изговора од сваког говорника, изговорених нормалним гласом. У зависности од вриједности SNR параметра, тестиран је пренос говорног сигнала у VLC систему без примјене заштитног кодовања, те уз примјену Хеминговог кода (7, 4) и RS кода (7, 3). Дијелови кодова који су кориштени у овом дијелу истраживања дати су у Прилогу 4. Поред могућности поређења перформанси PESQ и ViSQOL метода, главни циљ јесте да се испита која техника кодовања више доприноси повећању MOS-LQO резултата, добијеног кориштењем PESQ, односно ViSQOL методе. Резултати примјеном PESQ методе су приказани на Слици 4.1, док су резултати примјеном ViSQOL методе приказани на Слици 4.2. Обје слике приказују резултате у сва три тестирана сценарија – без примјене заштитног кодовања, уз примјену Хеминговог кода (7, 4), те уз примјену RS кода (7, 3). Добијени резултати представљају средњу вриједност добијену од свих говорника за све изговоре, при одговарајућим вриједностима SNR параметра. Обједињени резултати за све гласове, те за мушке и женске гласове понаособ, представљени су у Табели 4.2. Како би оцјена квалитета примљеног аудио сигнала била што мјеродавнија, уз средњу вриједност приказана је и вриједност стандардне грешке на Сликама 4.1 и 4.2, односно вриједност стандардне девијације у Табели 4.2.



Слика 4.1 – MOS-LQO резултати добијени кориштењем PESQ методе



Слика 4.2 – MOS-LQO резултати добијени кориштењем ViSQOL методе

Добијени резултати показују да повећавањем вриједности SNR параметра расте и MOS-LQO резултат, у случају примјене и PESQ и ViSQOL методе, што је у складу са очекивањима. Јасан је значај примјене заштитног кодовања, с обзиром на то да се у том случају добија значајно бољи MOS-LQO резултат. Такође, добијени резултати показују да се бољи MOS-LQO резултат јавља када се VLC системом преноси мушки глас. Ипак, за уопштавање овог закључка потребан је статистички репрезентативан и бројан узорак.

Поређење техника заштитног кодовања које су кориштене у овом експерименту показује већу ефикасност Хеминговог кода (7, 4) у односу на RS код (7, 3), с обзиром на то да је његовом примјеном постигнут бољи MOS-LQO резултат. Кодни количник кориштеног Хеминговог кода (7, 4) износи 0.57, што значи да је редунданса 43%. Са друге стране, кодни количник RS кода (7, 3) износи 0.43, што значи да је редундантност 57%. Познато је да за довољно високе вриједности параметра SNR, већа редундантност значи да је кориштени код ефикаснији јер се постиже значајно мања вриједност BER. Мања BER вриједност имплицира бољи MOS-LQO резултат. Ипак, у овом експерименту, грешке које се јављају нису налетне него су појединачне и статистички независне, односно узроковане су присуством адитивног бијелог Гаусовог шума (енг. *Additive White Gaussian Noise* – AWGN). Према томе, у AWGN каналу је мања вјероватноћа да ће се појавити налетне грешке за које RS код (7, 3) има способност исправљања. Стога, у таквом каналу Хемингов код (7, 4) може исправити више грешака него RS код (7, 3) и самим тим допринијети бољим резултатима. Дакле, у спроведеном експерименту, када се користе и PESQ и ViSQOL методе за процјену квалитета говорног сигнала, ефикасније је користити Хемингов код (7, 4).

Табела 4.2 – Обједињени MOS-LQO резултати за све тестиране случајеве

SNR		PESQ			ViSQOL		
		Сви гласови	Мушки гласови	Женски гласови	Сви гласови	Мушки гласови	Женски гласови
		Средња вриједност ± стандардна девијација	Средња вриједност ± стандардна девијација	Средња вриједност ± стандардна девијација	Средња вриједност ± стандардна девијација	Средња вриједност ± стандардна девијација	Средња вриједност ± стандардна девијација
7	Без кодовања	1.32 ± 0.15	1.38 ± 0.16	1.25 ± 0.11	1 ± 0	1 ± 0	1 ± 0
	Хемингов код (7, 4)	1.28 ± 0.12	1.30 ± 0.13	1.26 ± 0.10	1.03 ± 0.18	1.06 ± 0.26	1 ± 0
	RS код (7, 3)	1.39 ± 0.18	1.48 ± 0.17	1.30 ± 0.14	1 ± 0	1 ± 0	1 ± 0
8	Без кодовања	1.34 ± 0.16	1.40 ± 0.17	1.27 ± 0.11	1.02 ± 0.12	1.03 ± 0.17	1 ± 0
	Хемингов код (7, 4)	1.25 ± 0.17	1.26 ± 0.21	1.24 ± 0.12	1.37 ± 0.60	1.43 ± 0.67	1.17 ± 0.34
	RS код (7, 3)	1.45 ± 0.20	1.57 ± 0.16	1.34 ± 0.17	1.02 ± 0.16	1.04 ± 0.22	1 ± 0
9	Без кодовања	1.37 ± 0.17	1.43 ± 0.18	1.30 ± 0.12	1.03 ± 0.21	1.05 ± 0.29	1.01 ± 0.06
	Хемингов код (7, 4)	1.37 ± 0.43	1.47 ± 0.57	1.28 ± 0.19	2.58 ± 0.88	2.83 ± 0.85	2.34 ± 0.86
	RS код (7, 3)	1.51 ± 0.24	1.66 ± 0.19	1.35 ± 0.16	1.18 ± 0.37	1.20 ± 0.43	1.16 ± 0.31
10	Без кодовања	1.38 ± 0.16	1.43 ± 0.18	1.34 ± 0.13	1.10 ± 0.33	1.12 ± 0.39	1.09 ± 0.25
	Хемингов код (7, 4)	2.13 ± 0.99	2.46 ± 1.20	1.80 ± 0.60	3.73 ± 0.86	3.98 ± 0.80	3.48 ± 0.85
	RS код (7, 3)	1.58 ± 0.34	1.81 ± 0.29	1.35 ± 0.19	2.03 ± 0.79	2.07 ± 0.86	1.99 ± 0.71
11	Без кодовања	1.35 ± 0.18	1.36 ± 0.20	1.33 ± 0.15	1.57 ± 0.65	1.69 ± 0.67	1.44 ± 0.60
	Хемингов код (7, 4)	3.61 ± 1.12	3.81 ± 1.01	3.40 ± 1.20	4.62 ± 0.53	4.71 ± 0.49	4.52 ± 0.55
	RS код (7, 3)	2.22 ± 0.67	2.62 ± 0.53	1.81 ± 0.54	3.68 ± 0.57	3.73 ± 0.54	3.63 ± 0.61
12	Без кодовања	1.52 ± 0.36	1.60 ± 0.44	1.44 ± 0.22	2.68 ± 0.88	2.92 ± 0.82	2.44 ± 0.89
	Хемингов код (7, 4)	4.46 ± 0.32	4.43 ± 0.32	4.49 ± 0.32	4.97 ± 0.11	4.97 ± 0.12	4.97 ± 0.10
	RS код (7, 3)	3.82 ± 0.80	4.08 ± 0.54	3.56 ± 0.93	4.82 ± 0.34	4.81 ± 0.34	4.83 ± 0.34
13	Без кодовања	2.21 ± 0.76	2.33 ± 0.83	2.08 ± 0.68	3.66 ± 0.83	3.91 ± 0.81	3.41 ± 0.76
	Хемингов код (7, 4)	4.55 ± 0	4.55 ± 0	4.55 ± 0	5 ± 0	5 ± 0	5 ± 0
	RS код (7, 3)	4.47 ± 0.35	4.48 ± 0.31	4.45 ± 0.39	4.99 ± 0.09	5 ± 0	4.98 ± 0.13
14	Без кодовања	3.73 ± 0.98	3.90 ± 0.85	3.56 ± 1.09	4.58 ± 0.58	4.70 ± 0.62	4.46 ± 0.53
	Хемингов код (7, 4)	4.55 ± 0	4.55 ± 0	4.55 ± 0	5 ± 0	5 ± 0	5 ± 0
	RS код (7, 3)	4.55 ± 0	4.55 ± 0	4.55 ± 0	5 ± 0	5 ± 0	5 ± 0
15	Без кодовања	4.51 ± 0.21	4.50 ± 0.26	4.51 ± 0.14	4.98 ± 0.09	4.98 ± 0.09	4.98 ± 0.09
	Хемингов код (7, 4)	4.55 ± 0	4.55 ± 0	4.55 ± 0	5 ± 0	5 ± 0	5 ± 0
	RS код (7, 3)	4.55 ± 0	4.55 ± 0	4.55 ± 0	5 ± 0	5 ± 0	5 ± 0

Такође, од великог је значаја пронаћи кључну вриједност SNR параметра за коју MOS-LQO резултат постаје значајно бољи, односно вриједност за коју квалитет сигнала постаје барем *задовољавајућ*, на основу MOS ACR скале приказане у Табели 3.1. Те вриједности, у случајевима без кодовања, са RS (7, 3) кодом и Хеминговим (7, 4) кодом износе 14 dB, 12 dB и 11 dB, респективно, за PESQ методу; односно 13 dB, 11 dB и 10 dB, респективно, за ViSQOL методу. У ту сврху, поређење објективних метода за процјену квалитета говорног сигнала показује да, за најмање вриједности у тестираном опсегу вриједности SNR параметра, PESQ метода даје бољи MOS-LQO резултат. Ипак, MOS-LQO резултат расте брже кориштењем ViSQOL методе, те евентуално и достиже максималну вриједност од 5 на MOS ACR скали, стога је кориштење ViSQOL методе у том погледу ефикасније. Надаље, за опсег вриједности SNR параметра у оквиру ког MOS-LQO резултат расте од минималног ка максималном, вриједности стандардне девијације у појединим случајевима примјене PESQ методе су изузетно велике и чак премашују вриједност од 1, што представља још један недостатак кориштења PESQ методе у овом истраживању.

Дакле, спроведеним истраживањем је показано да је квалитет говорног сигнала који се преноси у VLC систему значајно побољшан примјеном техника заштитног кодовања. Међутим, посебну пажњу треба обратити на врсту шума у каналу, с обзиром на то да има директан утицај на перформансе примијењене технике кодовања. Такође, веома значајан параметар је и кодни количник кориштених техника кодовања јер има велики утицај на сложеност процеса декодовања, а самим тим и на добијене резултате. С обзиром на то да је овај дио истраживања спроведен рачунарском симулацијом, од велике је важности напоменути да у реалном окружењу може доћи до одступања од ових резултата.

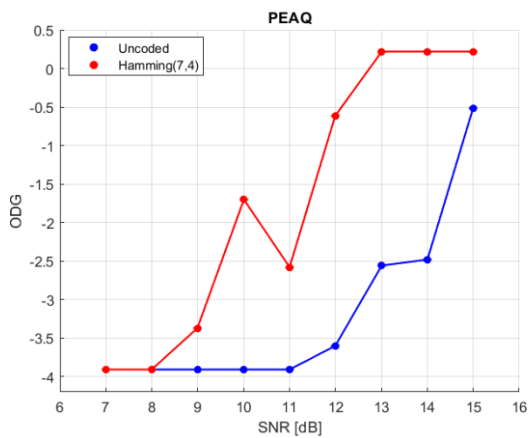
4.2 Процјена квалитета осталих класа аудио сигнала

Претходно истраживање је даље проширено и на остале класе аудио сигнала, тако да је примјеном PEAQ методе извршена процјена квалитета сљедећих аудио сигнала из одговарајућих класа:

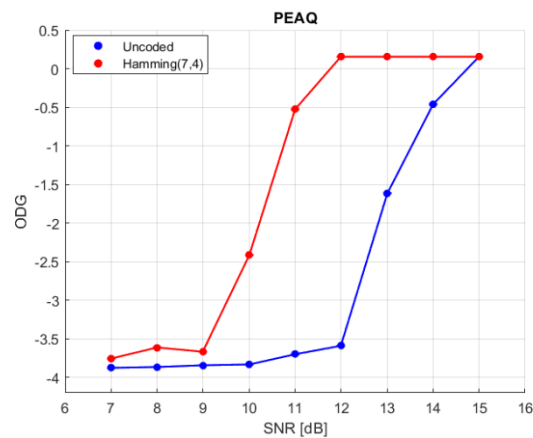
- природни звук окружења (цвркулт птица),
- вјештачки звук окружења (звук саобраћајне гужве),
- музика:
 - симфонијска композиција,
 - оперска изведба,
 - инструментал пјесме савремене поп музике,
 - пјесма савремене поп музике.

Прва два наведена аудио сигнала преузета су са платформе *Freesound* [55], док су сви кориштени музички сигнали доступни за преузимање на стриминг платформи *Spotify*

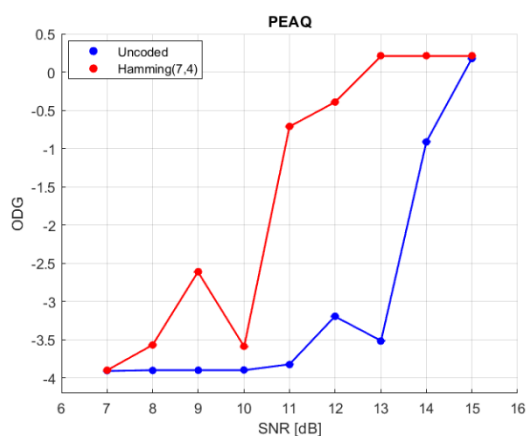
Premium [56]. С обзиром на то да су добијени резултати процјене квалитета говорног сигнала у претходном поглављу показали већу ефикасност примјене Хеминговог кода (7, 4) у односу на RS код (7, 3), само је Хемингов код (7, 4) као техника заштитног кодовања примијењен приликом проширеног истраживања на остале класе аудио сигнала. Такође, мањи кодни количник RS кода (7, 3), односно његова већа редундантност, за последицу има значајно дуже вријеме извршавања симулације, с обзиром на то да је сложеност процеса декодовања много већа. То је још један додатни разлог зашто је у случају испитивања PEAQ методе примијењен само Хемингов код (7, 4). Кориштена је MATLAB верзија PEAQ алгорита која је доступна у [57]. Сви кориштени аудио сигнали су .wav формата, фреквенције одмјеравања 48 kHz, уз примјену 16-битне РСМ. Трајања аудио сигнала су између 6 и 12 s. Сви кориштени аудио фајлови налазе се и на компакт диску који је приложен уз рад. Добијени ODG резултати су приказани на Сликама 4.3 – 4.8.



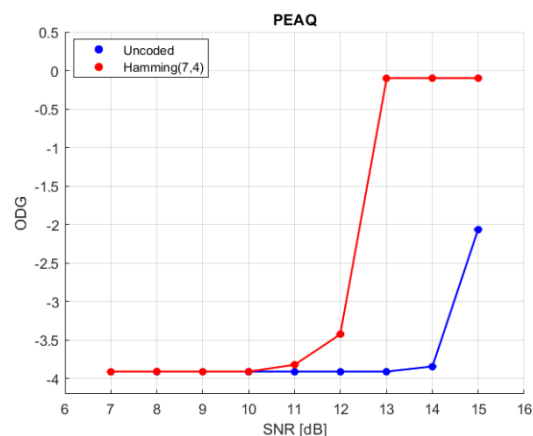
Слика 4.3 – ODG резултати – цврнут птице



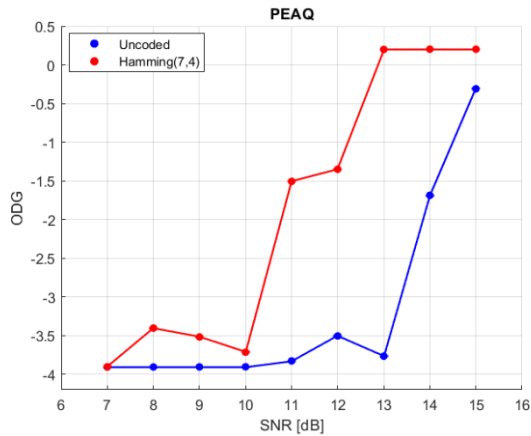
Слика 4.4 – ODG резултати – звук саобраћајне гужве



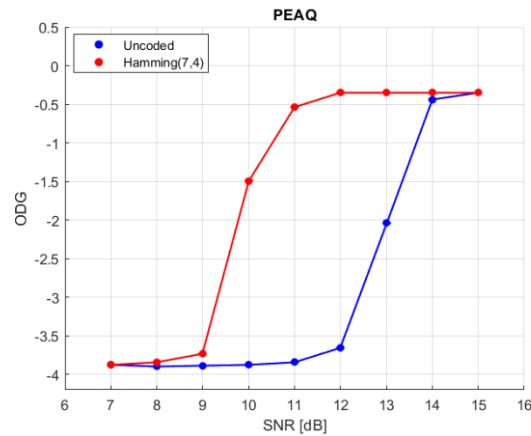
Слика 4.5 – ODG резултати – симфонијска композиција



Слика 4.6 – ODG резултати – оперска изведба



Слика 4.7 – ОДГ резултати – инструментал пјесме савремене поп музике



Слика 4.8 – ОДГ резултати – пјесма савремене поп музике

Добијени ОДГ резултати показују значајан допринос примјене Хеминговог кода (7, 4). Када нема примјене заштитног кодовања, ОДГ резултат у већини случајева постаје бар *задовољавајућ* тек за највише вриједности SNR параметра из посматраног опсега, док примјеном Хеминговог кода (7, 4) процијењени квалитет примљеног аудио сигнала постаје бољи и за мање вриједности SNR параметра. Стога, примјена без заштитног кодовања је потврдила чињеницу да је PEAQ алгоритам дизајниран само да оцјењује сигнале са изузетно малим оштећењима.

Ипак, иако су тестирани аудио фајлови истог формата и исте фреквенције одмјеравања, добијени резултати се разликују и у великој мјери зависе од самог типа аудио сигнала. Чак се и музички аудио сигнали, иако припадају истој класи звука, међусобно разликују на основу примљеног квалитета сигнала, с обзиром на то да је тестиран разнолик спектар музичких сигнала. Надаље, јасно је да кретање ОДГ резултата генерално има тенденцију раста како расте вриједност SNR параметра, али оно за поједине аудио сигнале нема униформан раст. Ипак, девијације у кретању ОДГ резултата се јављају када је ОДГ вриједност испод *задовољавајућег* нивоа, тако да примјена одговарајућих SNR вриједности у том случају, за тестирани VLC систем, свакако не би била од практичног значаја.

Генерално, примјеном заштитног кодовања се постижу добри ОДГ резултати за све тестиране типове аудио сигнала. Оперска изведба, која садржи гласно пјевање извођача изузетно високим тоновима уз значајну инструменталну пратњу, показала се као тип музичког сигнала са најлошијим резултатима у тестираном опсегу SNR вриједности. Значајно је и запажање да ОДГ резултати тестиране пјесме савремене поп музике, која подразумева присуство и вокала и инструментала, много брже расту него у случају када се тестира само њен инструментал.

Максималне вриједности ODG резултата бивају различите за све тестиране аудио сигнале, с обзиром на то да у појединим случајевима оне премашују теоретски максималну ODG вриједност од 0. Тиме се још једном потврђује изузетна осјетљивост PEAQ алгоритма како на квалитет, тако и на саму класу звука којој тестирани примјер припада. Такође, то је последица сложености процеса израчунавања, али и непотпуне усаглашености између кориштене имплементације PEAQ алгоритма у програмском пакету MATLAB и ITU-R BS.1387 препоруке [58]. Ипак, закључак је да имплементација PEAQ алгоритма представља обећавајуће и веома ефикасно средство у перцептивној процјени аудио материјала.

5. Експериментална поставка и анализа перформанси у реалном окружењу

За разлику од експеримента у симулационом окружењу, због многих физичких ограничења у експерименту у реалном окружењу квалитет примљеног аудио сигнала мјерен је искључиво кориштењем уобичајених објективних параметара: THD, IMD, SNR, те односа сигнал-шум и изобличења (енг. *Signal-to-Noise and Distortion* – SINAD). Како је и раније речено у Глави 3, наведени параметри јесу добар индикатор квалитета аудио сигнала, али битно је нагласити да не моделују психоакустичке карактеристике људског слушног система.

THD: Фактор хармонијских изобличења, или укупна хармонијска дисторзија, представља мјерење хармонијских изобличења присутних у сигналу и дефинише се као однос збира снага свих хармонијских компоненти и снаге компоненте на основној фреквенцији. Када је главни критеријум перформанси „чистоћа“ оригиналног синусног таласа, односно допринос оригиналне фреквенције у односу на њене хармонике, мјерење се најчешће дефинише као однос RMS (енг. *Root Mean Square*) вриједности напона виших хармонијских компоненти и RMS вриједности напона компоненте на основној фреквенцији.

IMD: Интермодулациона изобличења настају када се два сигнала различитих фреквенција примјењују заједно на улазу нелинеарног уређаја. Спектар излазног сигнала може садржати компоненте на основним фреквенцијама, цјелобројним умношцима основних фреквенција, те на фреквенцијама које представљају збир или разлику основних фреквенција, односно умножака основних фреквенција. Аудио анализатор *Agilent U8903A*, који се користи у овом експерименту, има могућност мјерења вриједности SMPTE (енг. *Society of Motion Picture & Television Engineers*) IMD параметра. SMPTE IMD је најчешће кориштена и оптимална техника за мјерење IMD, према стандарду SMPTE RP120-1983. SMPTE IMD таласни облик се може конфигурисати са горњом фреквенцијом, доњом фреквенцијом, амплитудом и DC *Offset* вриједности. Подразумијевана горња и доња фреквенција су 7 kHz и 60 Hz, респективно. Постоје унапријед дефинисани двоструки синусни таласи са три различита односа амплитуда између сигнала доње и сигнала горње фреквенције, а који износе 1:1, 4:1 и 10:1. SMPTE IMD се подразумијевано изражава у dB, а може да се изрази и у процентима. Уколико је основна доња фреквенција f_1 , а основна горња фреквенција f_2 , за SMPTE IMD мјерење узимају се у обзир сљедеће компоненте фреквенције: $f_2 - f_1$, $f_2 + f_1$, $f_2 - 2f_1$ и $f_2 + 2f_1$ [59].

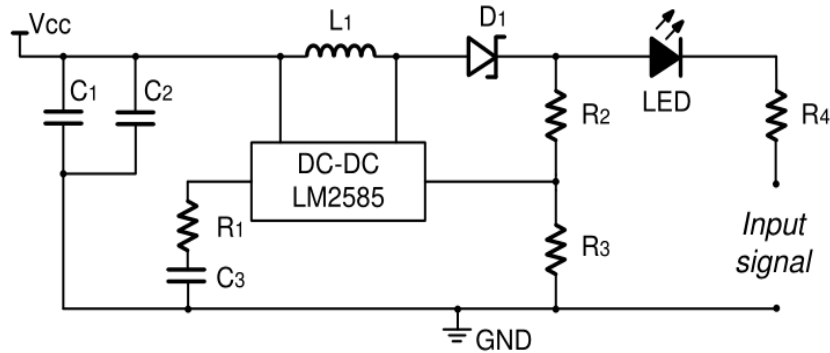
SNR: Однос сигнал-шум представља однос снаге сигнала и снаге шума, и најчешће се изражава у dB. Поред тога што је SNR веома важан параметар који утиче на перформансе и квалитет система који обрађује или преноси сигнале, гдје висок SNR значи да је сигнал јасан и лак за реконструкцију или интерпретацију, SNR такође, уз познату вриједност ширине пропусног опсега канала, одређује и максималну могућу количину података која се може поуздано пренијети преко датог канала. Наведено представља Шенон-Хартлијеву теорему која је основна теорема у теорији информација.

SINAD: У случајевима када је SNR вриједност ниска, као мјера квалитета звука користи се однос сигнал-шум и изобличење. SINAD се дефинише као однос укупне снаге сигнала, која представља збир снаге корисног сигнала и снага компоненти изобличења и шума, према збиру снага компоненти изобличења и шума. Вриједност SINAD параметра никада не може бити мања од 1 и увијек је позитивна када се изражава у dB.

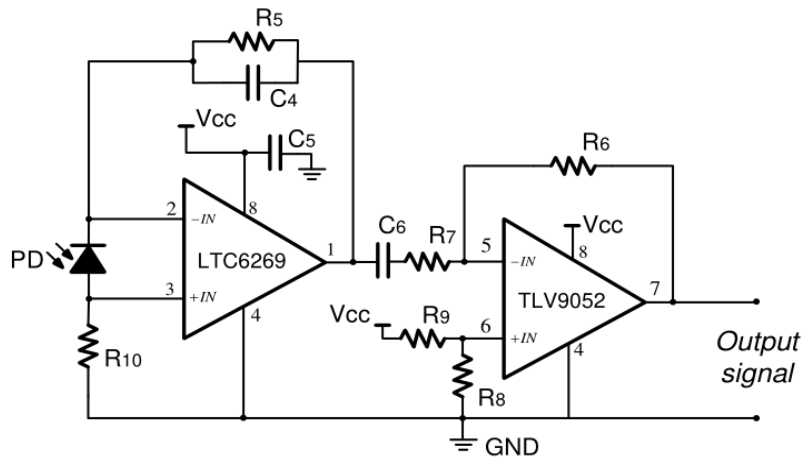
За процјену квалитета аудио сигнала у аналогном IM/DD VLC преносу у реалном окружењу кориштене су OpenVLC плочице, тзв. „плаштови“ (енг. *capes*) или „шилдови“ (енг. *shields*) верзије 1.3, представљени у [60]. У овој верзији, поред „плаштова“, OpenVLC1.3 платформа састоји се још и од уграђене плоче BBB (енг. *BeagleBone Black*), OpenVLC фирмвера и OpenVLC драјвера. Уопштено, OpenVLC је VLC платформа отвореног кода (енг. *open-source*) која је веома флексибилна и јефтина, а намијењена је за брзо прављење прототипа нових системских протокола за изградњу VLC мреже. Сви кодови и шеме су доступни у [61]. Платформа ради на исплативој и моћној уграђеној плочи величине обичне кредитне картице. OpenVLC испуњава све захтјеве за пружање IoT услуга заснованих на VLC технологији, показујући да је одговарајућа платформа за обављање најсавременијих истраживања. OpenVLC1.3 може постићи брзину преноса до 400 kb/s на транспортном слоју. Најновија верзија 1.4 подржава пренос на раздаљини до 20 m [62].

Кориштена OpenVLC плочица заправо представља *front-end* примопредајник. На основу доступних Gerber фајлова [61], „плашт“ је направљен као штампана плоча (енг. *Printed Circuit Board – PCB*) на коју су додатно залемљене остале потребне компоненте. Листа свих физичких компоненти кориштених за реализацију OpenVLC плочице, као и поступак реализације, могу се наћи у [63]. Електрични дијаграми предајника и пријемника представљени су на Сликама 5.1 и 5.2, респективно. DC напон напајања је 5 V. Предајник се састоји од регулатора напона и LED велике снаге. Да би се осигурала правилна поларизација LED, улазном сигналу је додат DC *Offset* напон. С друге стране, пријемник се састоји од фотодиоде, трансимпедансног појачавача (TIA) и инвертујућег појачавача. С обзиром на то да фотодиода генерише струју која је директно пропорционална интензитету свјетлости, TIA служи као претварач, претварајући струју у напонски сигнал. Додатно, помоћни појачавач обезбјеђује појачање са појачањем дефинисаним као негативним односом отпорника R_6 и R_7 , и оно је у овом случају у апсолутном износу једнако 10.

Специфициране вриједности кориштених компоненти за предајник и пријемник представљене су у Табелама 5.1 и 5.2, респективно.



Слика 5.1 – Електрична шема предајника



Слика 5.2 – Електрична шема пријемника

Табела 5.1 – Кориштене компоненте за предајник

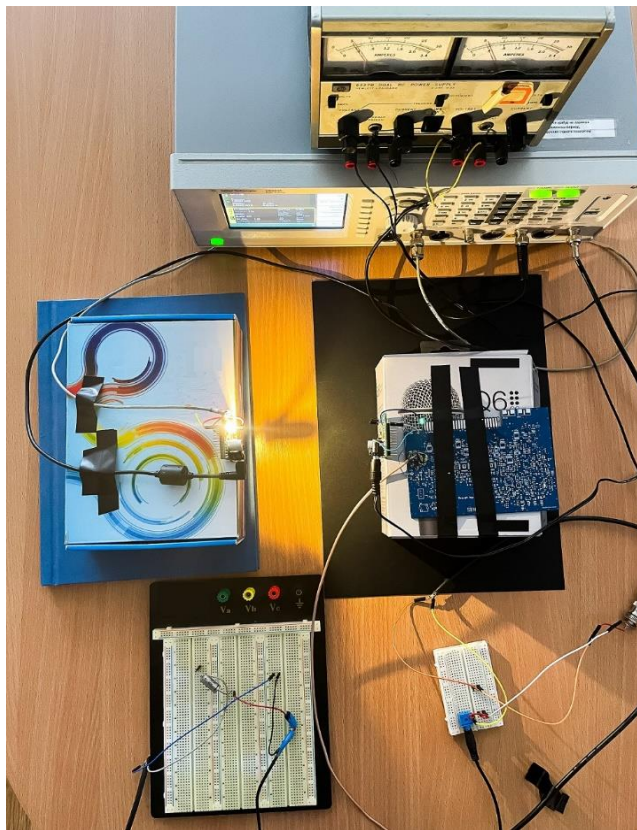
Ознака	Вриједност / назив
C_1	100 μF
C_2	0.1 μF
C_3	0.33 μF
R_1	3 $\text{k}\Omega$
R_2	12 $\text{k}\Omega$
R_3	1.5 $\text{k}\Omega$
R_4	13.6 $\text{k}\Omega$
L_1	33 μH
D_1	SK310AR3GCT
LED	XHP35A

Табела 5.2 – Кориштене компоненте за пријемник

Ознака	Вриједност / назив
PD	QSD2030
C_4	0.5 pF
C_5	0.1 μF
C_6	0.1 μF
R_5	75 $\text{k}\Omega$
R_6	100 $\text{k}\Omega$
R_7	10 $\text{k}\Omega$
R_8	150 Ω
R_9	150 Ω
R_{10}	1 $\text{k}\Omega$

Растојање између предајника и пријемника је у овом експерименту постављено на 15 cm. Експеримент је спроведен у лабораторијским условима у потпуном мраку, односно за ниво освијетљености од 0 Lux², те за промјену нивоа освијетљености на локацији фотодиоде од 100 до 1000 Lux, са кораком од 100 Lux. Ниво освијетљености на локацији фотодиоде је мјерен помоћу *Metrel Multinorm MI 6201* инструмента [64]. Генерисани сигнал је тест тон фреквенције 1 kHz, са вриједношћу THD параметра од 0.001%.

У спроведеном експерименту у реалном окружењу, квалитет примљеног сигнала је посматран мјерењем вриједности параметара THD, SMPTE IMD, SNR и SINAD, при вриједностима напона улазног тест тона од 5, 10 и 15 mVp. Свакој вриједности напона тест тона суперпониране су DC *Offset* вриједности од 2.26 и 2.30 V. Надаље, за мјерење вриједности параметра SMPTE IMD кориштени су тест тонови са фреквенцијама од 60 Hz и 7 kHz, чији је однос амплитуда 1:1. Пошто је за сваки тестирани параметар и сваки појединачни тестирани случај извршено десет узастопних мјерења, коначне вриједности представљају средњу вриједност добијених резултата са наведеном вриједношћу стандардне девијације. Експериментална поставка, коју чине предајник, пријемник, извор напајања и аудио анализатор *Agilent U8903A*, приказана је на Слици 5.3.



Слика 5.3 – Експериментална поставка

² Лукс је изведена јединица освијетљености. Једнака је једном лумену по квадратном метру. Разлика између лукса и лумена је та што лукс рачуна површину над којом се свјетлосни флуks шири.

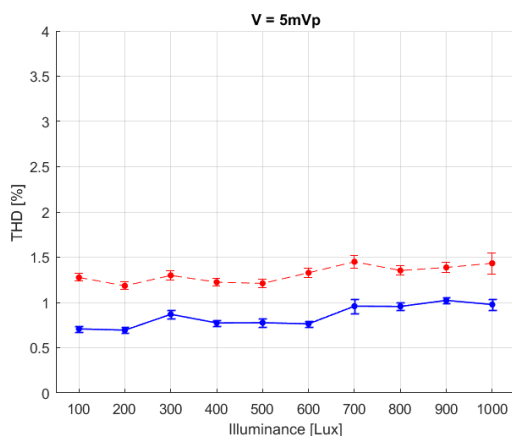
У истраживању у реалном окружењу, за процјену квалитета аудио сигнала није кориштен PEAQ алгоритам, с обзиром на то да аудио анализатор *Agilent U8903A* нема могућност меморисања примљеног аудио сигнала. Експеримент је прво спроведен у глувој соби на Електротехничком факултету у Бањој Луци, у којој је мјерен квалитет примљеног тест тона у случају потпуног мрака у просторији, дакле за ниво освијетљености од 0 Lux. Добијени резултати за све тестиране параметре приказани су у Табели 5.3. Резултати показују да, при истој вриједности напона улазног тест тона, DC Offset вриједност од 2.30 V доприноси бољим резултатима него вриједност од 2.26 V. Надаље, повећањем вриједности улазног напона повећава се и вриједност свих тестираних параметара, што двојако утиче на процијењени квалитет сигнала. Наиме, повећање вриједности THD и SMPTE IMD параметара представља негативну посљедицу, с обзиром на то да мања вриједност наведених параметара представља бољи квалитет сигнала. Са друге стране, повећање вриједности SNR и SINAD параметара указује на бољи квалитет сигнала. Дакле, иако је охрабрујућа чињеница да се за минималну вриједност улазног напона, при DC Offset вриједности од 2.30 V, постиже најмања вриједност THD, и то испод 2%, потребно је направити компромис уколико се за процјену квалитета аудио сигнала у условима потпуног мрака узимају сва четири тестирана параметра.

Табела 5.3 – Резултати добијени у случају освијетљености од 0 Lux

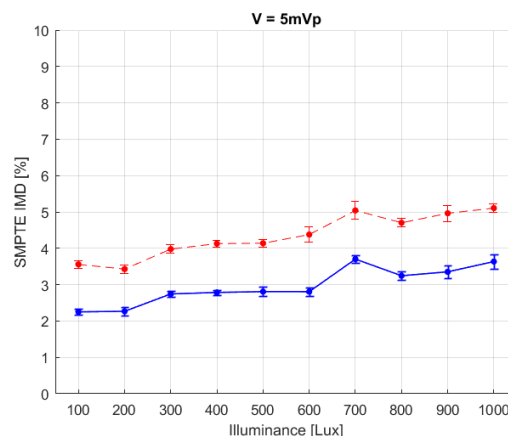
		THD [%]	SMPTE IMD [%]	SNR [dB]	SINAD [dB]
		Средња вриједност ± стандардна девијација	Средња вриједност ± стандардна девијација	Средња вриједност ± стандардна девијација	Средња вриједност ± стандардна девијација
DC Offset = 2.26 V	V = 5 mVp	2.54 ± 0.16	10.23 ± 0.54	8.07 ± 0.23	9.83 ± 0.11
	V = 10 mVp	3.16 ± 0.10	9.27 ± 0.36	13.66 ± 0.25	15.61 ± 0.09
	V = 15 mVp	4.67 ± 0.08	11.82 ± 0.53	17.08 ± 0.53	18.58 ± 0.17
DC Offset = 2.30 V	V = 5 mVp	1.88 ± 0.09	6.96 ± 0.36	11.56 ± 0.29	13.54 ± 0.19
	V = 10 mVp	2.82 ± 0.09	7.66 ± 0.33	17.33 ± 0.22	19.25 ± 0.14
	V = 15 mVp	4.19 ± 0.03	11.23 ± 0.44	20.91 ± 0.35	21.94 ± 0.13

Наставак експеримента је спроведен премјештањем поставке у другу просторију са прозорима и венецијанерима, како би се могао контролисати ниво спољашње освијетљености који се мјери на мјесту фотодиоде. Од велике је важности нагласити да је цијела експериментална поставка изузетно зависна од помјерања и било каквих механичких утицаја, стога се добијени резултати добијени у случајевима спољашње освијетљености од 100 до 1000 Lux не могу директно довести у корелацију са резултатима добијеним у случају потпуног мрака у другој просторији. Резултати добијени за THD параметар, за вриједности улазног напона од 5, 10 и 15 mVp, приказани су на Слици 5.4. Испрекиданом линијом су представљени резултати у случају DC Offset вриједности од 2.26 V, док су пуном линијом

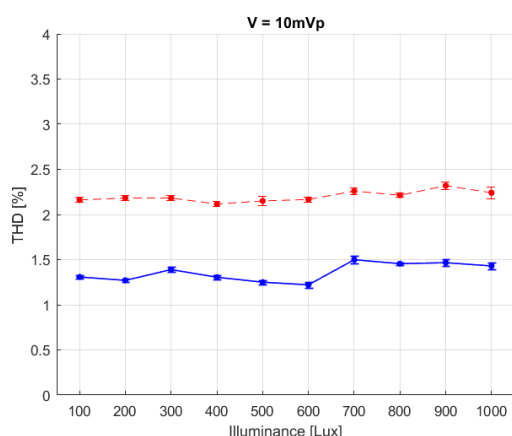
представљени резултати када DC Offset вриједност износи 2.30 V. Истим принципом, резултати добијени за SMPTE IMD параметар приказани су на Слици 5.5.



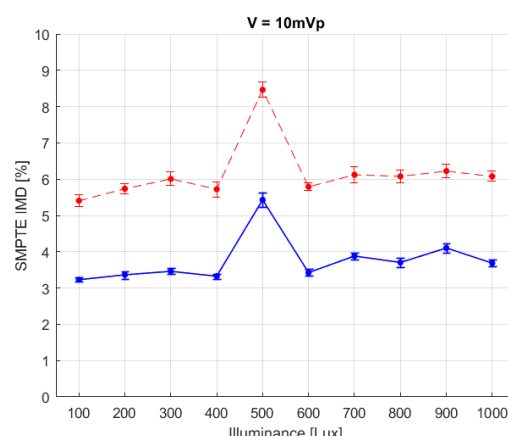
a) $V=5 \text{ mVp}$



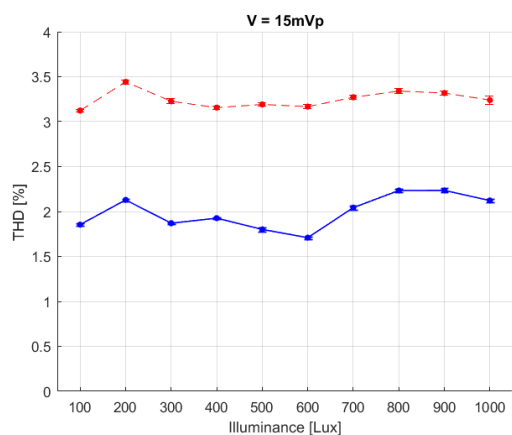
a) $V=5 \text{ mVp}$



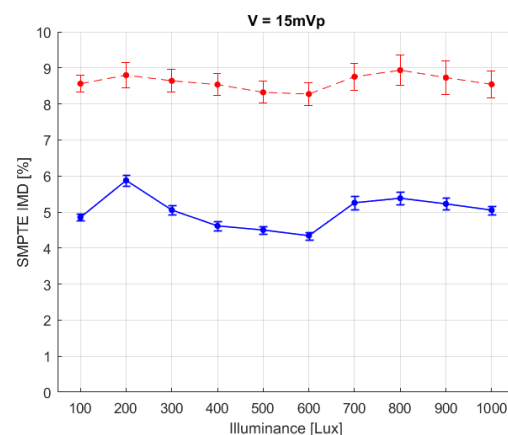
б) $V=10 \text{ mVp}$



б) $V=10 \text{ mVp}$



в) $V=15 \text{ mVp}$



в) $V=15 \text{ mVp}$

Слика 5.4 – THD у зависности од
освијетљености
(испрекидана линија: DC Offset=2.26 V,
пуна линија: DC Offset=2.30 V)

Слика 5.5 – SMPTE IMD у зависности од
освијетљености
(испрекидана линија: DC Offset=2.26 V,
пуна линија: DC Offset=2.30 V)

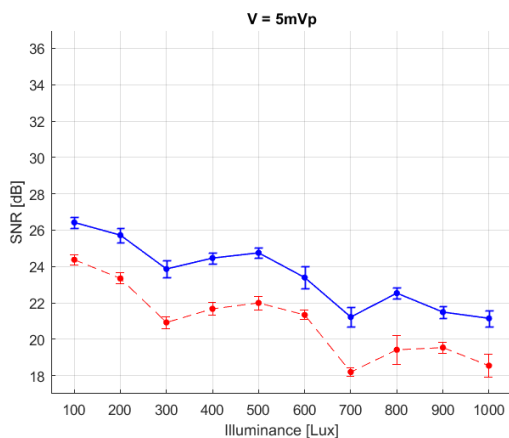
Резултати показују да повећањем освијетљености на мјесту фотодиоде вриједности THD и SMPTE IMD параметара имају тенденцију раста, што значи да постоји тенденција погоршања у квалитету примљеног сигнала. Јасно је да се примјеном DC *Offset* вриједности од 2.30 V постиже бољи квалитет сигнала, што је аналогно понашање као у случају испитивања у потпуном мраку. Ипак, супротно очекивањима, резултати показују да се у случајевима спољашње освијетљености постиже бољи квалитет сигнала него у потпуном мраку. То може бити последица промјене мјеста експерименталне поставке и њене осјетљивости на било какве механичке утицаје, стога не би требало доводити у директну везу ова два тестирана сценарија. Циљ је испитати тенденције у добијеним резултатима и пронаћи оптималну конфигурацију параметара у случају у мраку и у случају са спољашњом освијетљености, понаособ.

Надаље, са повећањем вриједности улазног напона квалитет сигнала опада, с обзиром на то да су вриједности поменутих параметара веће, при истом нивоу освијетљености. Од великог је значаја случај када је вриједност улазног напона 5 mVp и DC *Offset* вриједност 2.30 V, с обзиром на то да се тада постиже вриједност THD параметра испод 1%, чак и у случајевима највеће освијетљености. То је показатељ да се оптималном конфигурацијом кључних параметара преношеног сигнала у моделованом VLC систему може постићи врло добар квалитет аудио сигнала на пријему. Такође, добијене су јако мале вриједности стандардне девијације што може бити показатељ да су, за дату конфигурацију улазног напона и DC *Offset* вриједности, резултати у реалном времену прилично уједначени, а то је неоспорно обећавајући исход.

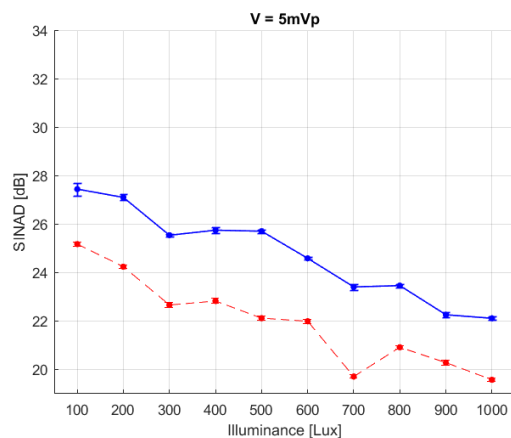
Иако повећањем освијетљености вриједности THD и SMPTE IMD параметара имају тенденцију раста, тај раст ипак није константан. За одређене вриједности освијетљености долази до наглих промјена у резултатима, првенствено код SMPTE IMD параметра (нпр. за конфигурацију $V=5$ mVp при освијетљености од 700 Lux, или $V=10$ mVp при освијетљености од 500 Lux). Детаљнији увид у узроке одступања у резултатима за поједине вриједности нивоа освијетљености, односно зашто резултати нису континуирано лошији са повећањем нивоа освијетљености, може бити предмет будућих истраживања.

Надаље, резултати добијени за SNR и SINAD параметре приказани су на Сликама 5.6 и 5.7, респективно. Повећање освијетљености узрокује погоршање квалитета сигнала и када се посматрају SNR и SINAD параметри, с обзиром на то да се њихове добијене вриједности смањују. Такође, и у овом случају DC *Offset* вриједност од 2.30 V доприноси бољим резултатима. За разлику од THD и SMPTE IMD параметара, повећање вриједности улазног напона, при константној DC *Offset* вриједности, доприноси бољем квалитету сигнала у погледу SNR и SINAD параметара. При највећем тестираном улазном напону и DC *Offset* вриједности од 2.30 V, за минималну спољашњу освијетљеност од 100 Lux, постиже се SNR од преко 36 dB што је показатељ доброг квалитета примљеног аудио сигнала. Такође, и за

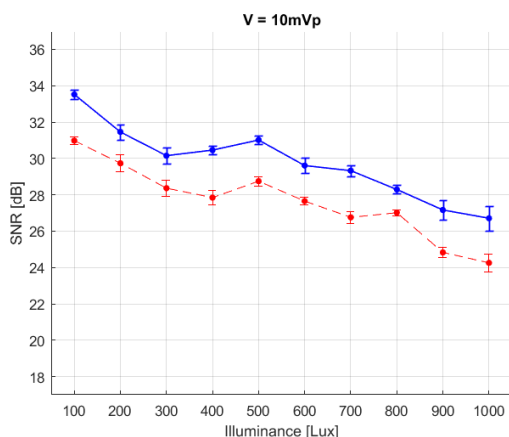
ова два параметра тенденције погоршања нису константне, с обзиром на то да за поједине вриједности нивоа освијетљености постоје изражена одступања у резултатима.



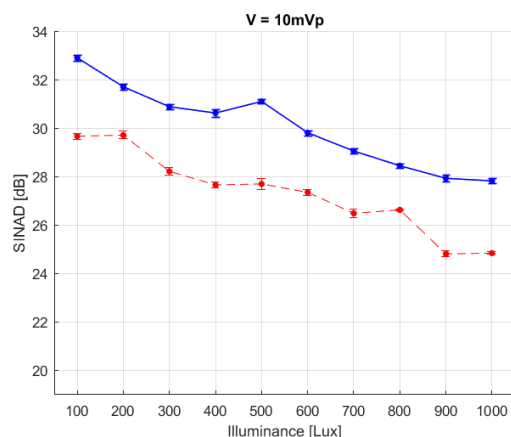
a) $V=5 \text{ mVp}$



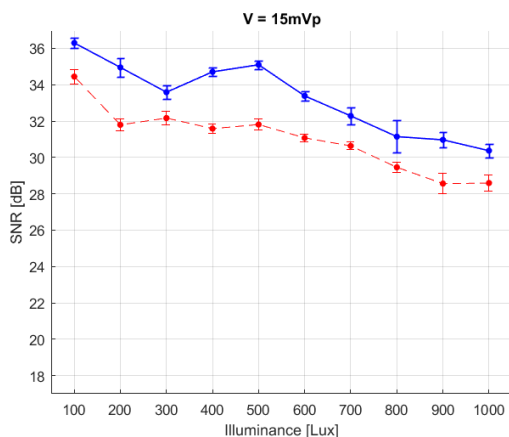
a) $V=5 \text{ mVp}$



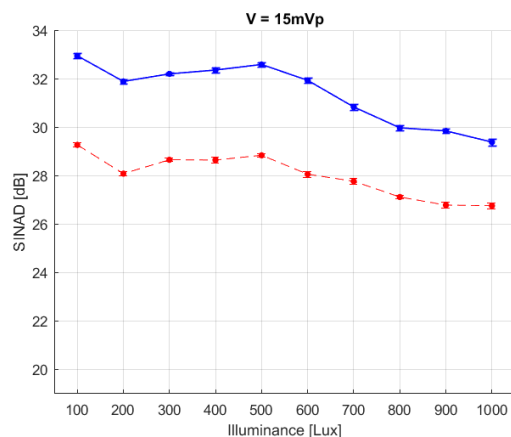
б) $V=10 \text{ mVp}$



б) $V=10 \text{ mVp}$



в) $V=15 \text{ mVp}$



в) $V=15 \text{ mVp}$

Слика 5.6 – SNR у зависности од освијетљености
(испрекидана линија: DC Offset=2.26 V,
пуна линија: DC Offset=2.30 V)

Слика 5.7 – SINAD у зависности од освијетљености
(испрекидана линија: DC Offset=2.26 V,
пуна линија: DC Offset=2.30 V)

Битно је нагласити да је у претходно поменутих сценаријима тестирана и *DC Offset* вриједност од 2.34 V. Ипак, та вриједност се показала као неадекватна, с обзиром на то да су варијације у добијеним резултатима биле изузетно велике и да у њиховом кретању није било јасне тенденције из које би се могао пронаћи јасан закључак о понашању система и процијењеном квалитету примљеног сигнала. С обзиром на наведено, ти резултати нису разматрани.

Дакле, узимајући у обзир све претходно добијене резултате, вриједност улазног напона, уз оптималну *DC Offset* вриједност од 2.30 V, треба изабрати тако да задовољи критеријуме за све параметре – да обезбиједи што је могуће нижи THD и SMPTE IMD и, истовремено, највећи могући SNR и SINAD. Ниво спољашње освијетљености треба да је што мањи како би се на пријему добили што бољи резултати. Генерално, добијени резултати су охрабрујући, с обзиром на то да исправном конфигурацијом параметара сигнала и моделованог VLC система, квалитет примљеног аудио сигнала може бити на задовољавајућем нивоу, чиме се потврђује подобност VLC технологије за примјену у преносу оваквог типа сигнала. Ипак, да би процјена квалитета аудио сигнала била потпуна и вјеродостојна, у будућем истраживању у реалном окружењу, поред кориштених објективних параметара било би корисно примијенити и PEAQ објективну методу процјене квалитета, с обзиром на то да она моделује психоакустичке карактеристике људског слушног система.

6. Закључак

У данашње вријеме, када потражња за бежичним ресурсима константно расте и посљедично постаје већа од расположивог капацитета којег нуди мрежа, тиме чинећи пренос у RF спектру преоптерећеним, VLC представља изузетно ефикасно рјешење за пружање бежичне комуникације. Употреба нелиценцираног спектра, изузетно велики пропусни опсег, високе фреквенције, доступност инфраструктуре, те велика енергетска ефикасност, само су неке од значајних карактеристика које издвајају ову технологију у домену бежичне комуникације. Међутим, иако је VLC релативно нов концепт, многи изазови попут треперења LED и њене нелинеарности, *uplink* комуникације, обезбјеђивања LOS, и даље отежавају комерцијализацију технологија и апликација заснованих на VLC, тако да овај домен захтијева додатно истраживање и оптимизацију. Ипак, VLC нуди одличну прилику да допуни постојећу бежичну инфраструктуру јер нуди повећане перформансе, нарочито у сценаријима комуникације кратког домета, у затвореним окружењима.

Широк спектар потенцијалних апликација у модерној данашњици чини VLC атрактивном технологијом за сценарије комуникације кратког домета, међу којима су позиционирање у затвореном простору, подводна комуникација, као и системи за комуникацију у возилима. Такође, имплементација VLC у домену IoT је од великог значаја, што, поред академије, подстиче и привлачи интересовање индустрије. Паметна расвјета и паметни домови су нека од рјешења гдје VLC може наћи своју примјену у домену IoT концепта. У таквим сценаријима, између осталог, могуће је обезбиједити и пренос аудио сигнала управо кориштењем VLC.

У многим савременим аудио и мултимедијалним мрежама и уређајима веома је важно обезбиједити прецизну и поуздану процјену квалитета широкопојасних аудио сигнала. Данас, када аудио стриминг сервиси спадају међу значајне потрошаче интернет капацитета, од велике је важности испорука аудио сигнала високог квалитета. Да би се процијенио квалитет испорученог аудио сигнала, користе се субјективне, али и објективне методе процјене квалитета које моделују психоакустичке карактеристике људског слушног система. Управо је у овом раду, кориштењем објективних метода PEAQ, PESQ и ViSQOL, али и уобичајених објективних параметара THD, SMPTE IMD, SNR и SINAD, извршена процјена квалитета аудио сигнала који је пренесен VLC комуникационом везом.

Сprovedено истраживање, како у симулацији тако и у реалном окружењу, показало је да оптичка бежична технологија може да обезбиједи поуздану аудио комуникацију, и то са прихватљивим нивоом изобличења. Анализом свих класа аудио сигнала, те примјеном

одговарајућих објективних метода процјене квалитета, показано је да се одговарајућим и пажљивим моделовањем VLC система и дефинисањем кључних параметара преношеног аудио сигнала постиже ефикасан пренос и задовољавајућ квалитет сигнала на пријемној страни VLC система.

Будућа истраживања у симулационом моделу могу укључивати разматрање других модулационих поступака и техника кодовања, али и другачије моделовање симулираног VLC система. Са друге стране, у постојећем експерименталном реалном окружењу, за процјену квалитета аудио сигнала пренесеног путем аналогне IM/DD VLC комуникационе везе може се разматрати и објективна PEAQ метода. Додатно, потенцијална будућа истраживања могу обухватити и испитивање перформанси дигиталног аудио VLC преноса.

Литература

- [1] L. E. M. Matheus, A. B. Vieira, L. F. M. Vieira, M. A. M. Vieira, and O. Gnawali, "Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3204-3237, Fourthquarter 2019, DOI: 10.1109/COMST.2019.2913348
- [2] A. C. Boucouvalas, P. Chatzimisios, Z. Ghassemloooy, M. Uysal, and K. Yiannopoulos, "Standards for indoor Optical Wireless Communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 3, pp. 24-31, March 2015, DOI: 10.1109/MCOM.2015.7060515
- [3] M. Uysal and H. Nouri, "Optical wireless communications — An emerging technology," 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Graz, Austria, July 2014, pp. 1-7, DOI: 10.1109/ICTON.2014.6876267
- [4] G. J. Holzmann and B. Pehrson, *The Early History of Data Networks*, Wiley-IEEE Computer Society Pr, December 1994, ISBN: 978-0-818-66782-4
- [5] A. G. Bell, W. G. Adams, Tyndall, and W. H. Preece, Discussion on "The photophone and the conversion of radiant energy into sound," *Journal of the Society of Telegraph Engineers*, vol. 9, pp. 375-383, January 1880, DOI: 10.1049/JSTE-1.1880.0044
- [6] F. E. Goodwin, "A review of operational laser communication systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 58, no. 10, pp. 1746-1752, October 1970, DOI: 10.1109/PROC.1970.7998
- [7] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light," *IEEE Std 802.15.7-2011*, pp. 1-309, September 2011, DOI: 10.1109/IEEESTD.2011.6016195
- [8] "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications," *IEEE Std 802.15.7-2018 (Revision of IEEE Std 802.15.7-2011)*, pp. 1-407, April 2019, DOI: 10.1109/IEEESTD.2019.8697198
- [9] "Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications Amendment: Higher Speed, Longer Range Optical Camera Communication (OCC)," *P802.15.7a*, доступно на: <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.7a/10367/>, посјећено: новембар 2023. године
- [10] S. Wu, H. Wang, and C. -H. Youn, "Visible light communications for 5G wireless networking systems: from fixed to mobile communications," *IEEE Network*, vol. 28, no. 6, pp. 41-45, November-December 2014, DOI: 10.1109/MNET.2014.6963803
- [11] M. Z. Chowdhury, M. K. Hasan, M. Shahjalal, M. T. Hossan, and Y. M. Jang, "Optical Wireless Hybrid Networks: Trends, Opportunities, Challenges, and Research Directions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 2, pp. 930-966, Secondquarter 2020, DOI: 10.1109/COMST.2020.2966855

- [12] M. Petkovic, D. Vukobratovic, A. Munari, and F. Clazzer, "Two-Tier Multi-Rate Slotted ALOHA for OWC/RF-Based IoT Networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 27, no. 4, pp. 1190-1194, April 2023, DOI: 10.1109/LCOMM.2023.3250028
- [13] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, and R. Parthiban, "LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1649-1678, Thirdquarter 2015, DOI: 10.1109/COMST.2015.2417576
- [14] E. Xie *et al.*, "Over 10 Gbps VLC for Long-Distance Applications Using a GaN-Based Series-Biased Micro-LED Array," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 32, no. 9, pp. 499-502, May 2020, DOI: 10.1109/LPT.2020.2981827
- [15] R. Ji, S. Wang, Q. Liu, and W. Lu, "High-Speed Visible Light Communications: Enabling Technologies and State of the Art," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 4, 589, April 2018, DOI: 10.3390/app8040589
- [16] S. Zhu *et al.*, "High-speed long-distance visible light communication based on multicolor series connection micro-LEDs and wavelength division multiplexing," *Photonics Research*, vol. 10, no. 8, pp. 1892-1899, August 2022, DOI: 10.1364/PRJ.459531
- [17] J. Hu *et al.*, "46.4 Gbps visible light communication system utilizing a compact tricolor laser transmitter," *Optics Express*, vol. 30, no. 3, pp. 4365-4373, January 2022, DOI: 10.1364/OE.447546
- [18] B. Wang, W. Sun, J. Chen, and C. Yu, "Frequency domain anti-flickering in visible light communication system," *Optics Communications*, vol. 516, August 2022, DOI: 10.1016/j.optcom.2022.128203
- [19] R. Lin *et al.*, "High bandwidth series-biased green micro-LED array toward 6 Gbps visible light communication," *Optics Letters*, vol. 47, no. 13, pp. 3343-3346, July 2022, DOI: 10.1364/OL.458495
- [20] S. Schmid, L. Arquint, and T. R. Gross, "Using smartphones as continuous receivers in a visible light communication system," *Proceedings of the 3rd Workshop on Visible Light Communication Systems*, pp. 61-66, October 2016: DOI: 10.1145/2981548.2981558
- [21] R. Sarwar *et al.*, "Visible light communication using a solar-panel receiver," 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Wuzhen, China, August 2017, pp. 1-3, DOI: 10.1109/ICOON.2017.8121577
- [22] B. Fahs, A. J. Chowdhury, and M. M. Hella, "A 12-m 2.5-Gb/s Lighting Compatible Integrated Receiver for OOK Visible Light Communication Links," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 16, pp. 3768-3775, August 2016, DOI: 10.1109/JLT.2016.2587598
- [23] Z. Wang, T. Mao, and Q. Wang, "Optical OFDM for visible light communications," 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Valencia, Spain, June 2017, pp. 1190-1194, DOI: 10.1109/IWCMC.2017.7986454
- [24] W. Moazzam, U. Ayub, A. Shahzad, and M. Shahid, "Design and Implementation of Visible Light Communication using Error Correction Turbo Codes," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 9, no. 4, pp. 741-749, April 2018, DOI: 10.13140/RG.2.2.13796.17282

- [25] D. Drajić and P. Ivaniš, *Uvod u teoriju informacija i kodovanje*, Akademska misao, Beograd, pp. 173-180, 2009.
- [26] G. Mitchell, "Investigation of Hamming, Reed-Solomon, and Turbo Forward Error Correcting Codes," Sensors and Electron Devices Directorate, Army Research Laboratory, July 2009.
- [27] S. Šajić and J. Galić, *Digitalne telekomunikacije*, Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, pp. 245-250, 2019.
- [28] S. S. Oyewobi, K. Djouani, and A. M. Kurien, "Visible Light Communications for Internet of Things: Prospects and Approaches, Challenges, Solutions and Future Directions," *Technologies*, vol. 10, no. 1, 28, February 2022, DOI: 10.3390/technologies10010028
- [29] Z. Zeng, S. Fu, H. Zhang, Y. Dong, and J. Cheng, "A Survey of Underwater Optical Wireless Communications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 204-238, Firstquarter 2017, DOI: 10.1109/COMST.2016.2618841
- [30] S. Sandoval-Reyes and A. Hernandez-Balderas, "Transmission of Digital Audio with Visible Light," *Research in Computing Science*, vol. 138, pp. 61-68, December 2017, DOI: 10.13053/rcs-138-1-6
- [31] J. Simon, T. Priyan, Prasanth, and P. Prakash, "Audio Transmission in Visible Light Using Li-Fi Technology," *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, vol. 6, no. 3, pp. 2815-2819, March 2018, DOI: 10.22214/ijraset.2018.3619
- [32] E. B. Adoptante, K. D. Cadag, V. R. Lualhati, M. L. D. R. Torregosa, and A. C. Abad, "Audio multicast by Visible Light Communication for location information for the visually impaired," 2015 International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM), Cebu, Philippines, December 2015, pp. 1-6, DOI: 10.1109/HNICEM.2015.7393226
- [33] M. Y. Soh, W. Xian Ng, Q. Zou, D. Lee, T. H. Teo, and K. Seng Yeo, "Real-Time Audio Transmission Using Visible Light Communication," TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference, Jeju, Korea (South), October 2018, pp. 2223-2226, DOI: 10.1109/TENCON.2018.8650145
- [34] J. T. B. Taufik, M. L. Hossain, and T. Ahmed, "Development of an Audio Transmission System Through an Indoor Visible Light Communication Link," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 9, no. 1, January 2019, pp. 432-438, DOI: 10.29322/IJSRP.9.01.2019.p8556
- [35] D. A. A. Putri, A. Hambali, E. S. Sugesti, and B. Pamukti, "Voice Delivery using The Visible Light Communication (VLC) Prototype on Line of Sight (LOS) Channels," 2020 6th International Conference on Science in Information Technology (ICSITech), Palu, Indonesia, October 2020, pp. 86-90, DOI: 10.1109/ICSITech49800.2020.9392077
- [36] A. Zaiton *et al.*, "Development of Electronic Exhibition Audio Guide System Using VLC," *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, vol. 10, no. 2-5, July 2018, pp. 141-144.

- [37] M. A. R. Eltokhy, M. Abdel-Hady, A. Haggag, M. El-Bendary, H. Ali, and T. Hosny, "Audio SIMO system based on visible light communication using cavity LEDs," *Multimedia Tools and Applications*, pp. 1-15, May 2023, DOI: 10.1007/s11042-023-15680-8
- [38] S. Bhattacharya, N. Das, S. Sahu, A. Mondal, and S. Borah, "Deep Classification of Sound: A Concise Review," In: V. H. Patil, N. Dey, P. N. Mahalle, M. S. Pathan, and V. V. Kimbahune, *Proceeding of First Doctoral Symposium on Natural Computing Research*, Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 169, Springer, pp. 33-43, March 2021, DOI: 10.1007/978-981-33-4073-2_4
- [39] X. Min, G. Zhai, J. Zhou, M. C. Q. Farias, and A. C. Bovik, "Study of Subjective and Objective Quality Assessment of Audio-Visual Signals," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 29, pp. 6054-6068, April 2020, DOI: 10.1109/TIP.2020.2988148
- [40] "Recommendation ITU-T P.800.1: Mean opinion score (MOS) terminology," International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector of ITU, July 2016.
- [41] A. A. de Lima *et al.*, "On the quality assessment of sound signals," 2008 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Seattle, WA, USA, May 2008, pp. 416-419, DOI: 10.1109/ISCAS.2008.4541443
- [42] "Recommendation ITU-R BS.1284-2: General methods for the subjective assessment of sound quality," International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector of ITU, January 2019.
- [43] "Recommendation ITU-R BS.1387-2: Method for objective measurements of perceived audio quality," International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector of ITU, May 2023.
- [44] D. Campbell, E. Jones, and M. Glavin, "Audio quality assessment techniques – A review, and recent developments," *Signal Processing*, vol. 89, no. 8, pp. 1489-1500, March 2009, DOI: 10.1016/j.sigpro.2009.02.015
- [45] "Recommendation ITU-T P.862: Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs," International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector of ITU, February 2001.
- [46] M. Mladen, J. Banović, J. Galić, G. Gardašević, and M. Petković, "Speech quality assessment in visible light communications," 2023 22nd International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, March 2023, pp. 1-6, DOI: 10.1109/INFOTEH57020.2023.10094155
- [47] P. C. Loizou, "Speech Quality Assessment," In: W. Lin, D. Tao, J. Kacprzyk, Z. Li, E. Izquierdo, and H. Wang, *Multimedia Analysis, Processing and Communications*, Studies in Computational Intelligence, vol. 346, Springer, pp. 623-654, 2011, DOI: 10.1007/978-3-642-19551-8_23
- [48] "Recommendation ITU-T P.862.2: Wideband extension to Recommendation P.862 for the assessment of wideband telephone networks and speech codecs," International

- Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector of ITU, November 2007.
- [49] “Recommendation ITU-T P.863: Perceptual objective listening quality prediction,” International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector of ITU, March 2018.
- [50] A. Hines, J. Skoglund, A. C. Kokaram, and Naomi Harte, “ViSQOL: an objective speech quality model,” *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*, vol. 13, pp. 1-18, May 2015, DOI: 10.1186/s13636-015-0054-9
- [51] F. B. da Silva and W. A. Martins, “A Computational Platform for Visible Light Communications,” *SBrT* 2017, pp. 891-895, September 2017, DOI: 10.14209/sbrt.2017.154
- [52] F. B. da Silva, GitHub, Visible-Light-Communication, доступно на: <https://github.com/fbs2112/Visible-Light-Communication>, посјећено: новембар 2023. године
- [53] Future Electronics, Technical Data Sheet 5 mm Round White LED (T-1 3/4) 334-15/T1C1-4WYA, доступно на: http://www1.futureelectronics.com/doc/EVERLIGHT%C2%A0/334-15_T1C1-4WYA.pdf, посјећено: новембар 2023. године
- [54] B. Marković, S. Jovičić, J. Galić, and Đ. Grozdić, “Whispered Speech Database: Design, Processing and Application,” International Conference – Text, Speech, and Dialogue, Pilsen, Czech Republic, pp. 591-598, September 2013, DOI: 10.1007/978-3-642-40585-3_74
- [55] Freesound, доступно на: <https://freesound.org/>, посјећено: новембар 2023. године
- [56] Spotify Premium, доступно на: <https://www.spotify.com/ba/premium/>, посјећено: новембар 2023. године
- [57] GitHub, PEAQ, доступно на: <https://github.com/NikolajAndersson/PEAQ>, посјећено: новембар 2023. године
- [58] D. Campeanu and A. Campeanu, “PEAQ – An objective method to assess the perceptual quality of audio compressed files,” *Computer Science*, 2005.
- [59] ©Agilent Technologies, Inc. 2011-2014, Agilent U8903A Audio Analyzer User’s Guide (Firmware 2.10.1.0 and above), Tenth Edition, 2014.
- [60] A. Galisteo, D. Juara, and D. Giustiniano, “Research in Visible Light Communication Systems with OpenVLC1.3,” 2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Limerick, Ireland, April 2019, pp. 539-544, DOI: 10.1109/WF-IoT.2019.8767252
- [61] GitHub, OpenVLC, доступно на: <https://github.com/openvlc/OpenVLC/>, посјећено: новембар 2023. године
- [62] B. G. Guzman, M. S. Mir, D. F. Fonseca, A. Galisteo, Q. Wang, and D. Giustiniano, “Prototyping Visible Light Communication for the Internet of Things Using OpenVLC,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 5, pp. 122-128, May 2023, DOI: 10.1109/MCOM.001.2200642
- [63] Boris Malčić, “Implementacija i testiranje OpenVLC platforme,” Projektni zadatak iz predmeta IoT tehnologije i aplikacije, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, 2023.
- [64] ©METREL d.d. Multinorm MI 6201 User Manual, Version 1.2, 2008.

Прилог

Прилог 1: Списак кориштених скраћеница

μ -LED – *Micro LED*
ACO-OFDM – *Asymmetrically Clipped Optical OFDM*
ACR – *Absolute Category Rating*
AGC – *Automatic Gain Control*
AM – *Amplitude Modulation*
AOA – *Angle of Arrival*
APD – *Avalanche Photodiode*
ASK – *Amplitude Shift Keying*
AWGN – *Additive White Gaussian Noise*
BBB – *BeagleBone Black*
BEN – *Beacon-Enabled Network*
BER – *Bit Error Rate*
BS – *Beacon Signal*
CAP – *Carrierless Amplitude and Phase Modulation*
CC – *Convolutional Code*
CCA – *Clear Channel Assessment*
CCR – *Comparative Category Rating*
CDMA – *Code Division Multiple Access*
CIM – *Color Intensity Modulation*
CMOS – *Comparative MOS*
CRC – *Cyclic Redundancy Check*
CRI – *Color Rendering Index*
CSK – *Color Shift Keying*
CSMA – *Carrier Sense Multiple Access*
CSMA/CA – *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*
DAB – *Digital Audio Broadcasting*
DCO-OFDM – *DC-biased Optical OFDM*
DCR – *Degradation Category Rating*
DD – *Direct Detection*
DFE – *Decision-Feedback Equalization*
DIFS – *Distributed Inter-Frame Spacing*
DME – *Device Management Entity*
DMOS – *Degradation MOS*
DRM – *Digital Radio Mondiale*

EMI – *Electro-Magnetic Interference*
FB – *Feedback*
FEC – *Forward Error Correction*
FF – *Feedforward*
FFT – *Fast Fourier Transform*
FIR – *Fast Infrared*
FM – *Frequency Modulation*
FOV – *Field of View*
FSO – *Free-Space Optical*
GCM – *Generalized Color Modulation*
Giga-IR – *Gigabit Infrared*
GSSK – *Generalized Space Shift Keying*
HDLC – *High-Level Data Link Control*
IAP – *Information Access Protocol*
IAS – *Information Access Service*
ICI – *Inter-Carrier Interference*
IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IM – *Intensity Modulation*
IMD – *Intermodulation Distortion*
IoT – *Internet of Things*
IR – *Infrared*
IrDA – *Infrared Data Association*
IRL – *Infrared Link*
IrLAP – *IrDA Link Access Protocol*
IrLMP – *IrDA Link Management Protocol*
IrMC – *Infrared Mobile Communication*
IrPHY – *IrDA Physical Layer*
ISI – *Inter-Symbol Interference*
ITS – *Intelligent Transport System*
LAN – *Local Area Network*
LCon – *Link Control*
LDPC – *Low-Density Parity-Check*
LED – *Light-Emitting Diode*
LLC – *Logical Link Control*
LM-MUX – *Link Management Multiplexer*
LOS – *Line of Sight*
LSAP – *Logical Service Access Point*
M2M – *Machine-to-Machine*
MAC – *Medium Access Control*
MCPS SAP – *MAC Common Part Sublayer SAP*

MIMO – *Multiple-Input and Multiple-Output*
MIR – *Medium Infrared*
MLME SAP – *MAC Link Management Entity SAP*
MOS – *Mean Opinion Score*
MOS-LQO – *MOS-Listening Quality Objective*
MOV – *Model Output Variable*
NDM – *Normal Disconnected Mode*
NLOS – *Non-Line of Sight*
NOMA – *Non-Orthogonal Multiple Access*
non-BEN – *non-Beacon-Enabled Network*
NRM – *Normal Response Mode*
NSIM – *Neurogram Similarity Index Measure*
OBEX – *Object Exchange*
OCC – *Optical Camera Communication*
OCDMA – *Optical CDMA*
ODG – *Overall Difference Grade*
OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
OFDMA – *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*
OLED – *Organic LED*
OMA – *Orthogonal Multiple Access*
OOC – *Orthogonal Optical Codes*
OOK – *On-Off Keying*
OSI – *Open Systems Interconnection*
OWC – *Optical Wireless Communication*
P&S – *Point-and-Shoot*
P2P – *Point-to-Point*
PAM – *Pulse Amplitude Modulation*
PAM-DMT – *Pulse-Amplitude-Modulated Discrete Multitone*
PAN – *Personal Area Network*
PAPR – *Peak-to-Average Power Ratio*
PCB – *Printed Circuit Board*
pc-LED – *Phosphor Converted LED*
PCM – *Pulse Code Modulation*
PCS – *Personal Communication Systems*
PD – *Photodiode*
PDM – *Power-Domain Multiplexing*
PDSM – *Pulse Dual Slope Modulation*
PEAQ – *Perceptual Evaluation of Audio Quality*
PESQ – *Perceptual Evaluation of Speech Quality*
PHY – *Physical*

PIN PD – *PIN Photodiode*
PLCP – *Physical Layer Convergence Protocol*
PLD – *PHY Layer Data*
PLME – *PHY Layer Management Entity*
PMD – *Physical Medium Dependent*
POLQA – *Perceptual Objective Listening Quality Analysis*
PPA – *Photo Parametric Amplifier*
PPM – *Pulse Position Modulation*
PPMPWM – *Pulse-Position-Pulse-Width Modulation*
PWM – *Pulse Width Modulation*
rc-LED – *Resonant Cavity LED*
RF – *Radio Frequency*
RGB – *Red, Green, Blue*
RLL – *Run-length Limited*
RMS – *Root Mean Square*
RS – *Reed-Solomon*
RSS – *Received Signal Strength*
SAP – *Service Access Point*
SC – *Superposition Coding*
SDMA – *Space Division Multiple Access*
SF – *Super-Frame*
SIC – *Successive Interference Cancellation*
SIMO – *Single-Input Multi-Output*
SINAD – *Signal-to-Noise and Distortion*
SIR – *Serial Infrared*
SMPTE – *Society of Motion Picture & Television Engineers*
SNR – *Signal-to-Noise Ratio*
SPL – *Sound Pressure Level*
SSCS – *Service-specific Convergence Sublayer*
TCP – *Transmission Control Protocol*
TDMA – *Time Division Multiple Access*
THD – *Total Harmonic Distortion*
TIA – *Trans-Impedance Amplifier*
TOA – *Time of Arrival*
TTP – *Tiny Transport Protocol*
UFIR – *Ultra Fast Infrared*
U-OFDM – *Unipolar OFDM*
USB – *Universal Serial Bus*
UV – *Ultraviolet*
UVC – *Ultraviolet Communication*

V2I – *Vehicle to Infrastructure*
V2LC – *Vehicle Visible Light Communication*
V2V – *Vehicle to Vehicle*
VFIR – *Very Fast Infrared*
ViSQOL – *Virtual Speech Quality Objective Listener*
VL – *Visible Light*
VLC – *Visible Light Communication*
VLP – *Visible Light Positioning*
VoIP – *Voice over Internet Protocol*
VPPM – *Variable Pulse Position Modulation*
WBAN – *Wireless Body Area Network*
WLAN – *Wireless Local Area Network*
WPAN – *Wireless Personal Area Network*
W-PESQ – *Wideband PESQ*
WQI – *Wavelength Quality Indication*

Прилог 2: Списак слика

Слика 2.1 – Електромагнетни спектар.....	4
Слика 2.2 – IrDA протокол стек	8
Слика 2.3 – Архитектура VLC система	20
Слика 2.4 – Архитектура VLC уређаја	24
Слика 2.5 – Основне мрежне топологије у VLC системима	35
Слика 3.1 – Основна класификација звука	44
Слика 3.2 – Блок дијаграм PEAQ алгоритма	50
Слика 3.3 – Блок дијаграм PESQ алгоритма.....	53
Слика 4.1 – MOS-LQO резултати добијени кориштењем PESQ методе	58
Слика 4.2 – MOS-LQO резултати добијени кориштењем ViSQOL методе.....	59
Слика 4.3 – ODG резултати – цврнут птице	62
Слика 4.4 – ODG резултати – звук саобраћајне гужве	62
Слика 4.5 – ODG резултати – симфонијска композиција.....	62
Слика 4.6 – ODG резултати – оперска изведба	62
Слика 4.7 – ODG резултати – инструментал пјесме савремене поп музике	63
Слика 4.8 – ODG резултати – пјесма савремене поп музике	63
Слика 5.1 – Електрична шема предајника	67
Слика 5.2 – Електрична шема пријемника	67
Слика 5.3 – Експериментална поставка	68
Слика 5.4 – THD у зависности од освијетљености	70
Слика 5.5 – SMPTE IMD у зависности од освијетљености	70
Слика 5.6 – SNR у зависности од освијетљености	72
Слика 5.7 – SINAD у зависности од освијетљености	72

Прилог 3: Списак табела

Табела 2.1 – Упоредни преглед водећих RF и IoT технологија са VLC	14
Табела 2.2 – Таласне дужине емитованих боја и одговарајући полупроводнички материјали	17
Табела 2.3 – Упоредни преглед основних карактеристика различитих типова LED	19
Табела 2.4 – Класе VLC уређаја и њихове карактеристике.....	23
Табела 2.5 – Спецификације PHY I слоја	25
Табела 2.6 – Спецификације PHY II слоја	26
Табела 2.7 – Спецификације PHY III слоја.....	26
Табела 2.8 – Упоредни приказ најчешће коришћених модулационих поступака у VLC.....	28
Табела 3.1 – MOS ACR скала	47
Табела 3.2 – MOS DCR скала	48
Табела 3.3 – MOS CCR скала.....	48
Табела 3.4 – PEAQ ODG скала и одговарајућа ITU-R BS.1387 оцјена	49
Табела 4.1 – Главни параметри коришћени за моделовање VLC система	57
Табела 4.2 – Обједињени MOS-LQO резултати за све тестиране случајеве	60
Табела 5.1 – Коришћене компоненте за предајник	67
Табела 5.2 – Коришћене компоненте за пријемник.....	67
Табела 5.3 – Резултати добијени у случају освијетљености од 0 Lux	69

Прилог 4: Дијелови кодова кориштених у симулационом дијелу истраживања

Учитавање референтног аудио сигнала на предајној страни моделованог VLC система и поступак кодовања у случају примјене Хеминговог кода (7, 4):

```
load whiteLED_334-15.mat;
filterFile = 'testDFEEq';
load([filterFile '.mat']);
M = 2;
numberOfBits = log2(M);

[snimak, Fs] = audioread(~fajlref, 'native');
snimak_integer = snimak + abs(min(snimak));
snimak_binarni = de2bi(snimak_integer, 16, M, 'left-msb');
snimak_binarni_niz = snimak_binarni(:);
deciInputData = double(snimak_binarni_niz);
CodedMsg = encode(deciInputData, 7, 4, 'hamming/binary');
blockLength = size(CodedMsg, 1);
```

Пријем демодулисаног сигнала на пријемној страни моделованог VLC система, поступак декодовања у случају примјене Хеминговог кода (7, 4), те креирање тестног аудио фајла:

```
binaryOutputData = de2bi(decDemodSignal, numberOfBits, 'left-msb');
e = circshift(binaryOutputData, -12);
DecodeMsg1 = decode(e, 7, 4, 'hamming/binary');
estimated_data_t = int16(Decomsg1);
rekonstruisani_binarni = reshape(estimated_data_t, [], 16);
rekonstruisani_integer = bi2de(rekonstruisani_binarni, M, 'left-msb');
rekonstruisani_snimak = int16(rekonstruisani_integer) - ((abs(min(snimak))));
rekonstruisani_snimakrr = (double(rekonstruisani_snimak)) / 32768.0;
audiowrite(~fajltest, rekonstruisani_snimakrr, Fs);
```

Учитавање референтног аудио сигнала на предајној страни моделованог VLC система и поступак кодовања у случају примјене RS кода (7, 3):

```
load whiteLED_334-15.mat;
filterFile = 'testDFEEq';
load([filterFile '.mat']);
M = 2;
numberOfBits = log2(M);

[snimak, Fs] = audioread(~fajltx, 'native');
snimak_integer = snimak + abs(min(snimak));
snimak_binarni = de2bi(snimak_integer, 16, M, 'left-msb');
[red, kolona] = size(snimak_binarni);
snimak_binarni_niz = snimak_binarni(:);
deciInputData = double(snimak_binarni_niz);
b = mod(length(deciInputData), 3);

if b == 1
    deciInputData(end+1:end+2) = 0;
end
if b == 2
    deciInputData(end+1) = 0;
end

duzina = length(deciInputData) / 3;
podaci = reshape(deciInputData, duzina, 3);
msg = gf(podaci, 3);
CodedMsg = rsenc(msg, 7, 3);
CodedMsg1 = CodedMsg.x;
kodovanaporuka_dec = CodedMsg1(:);
kodovanaporuka1 = de2bi(kodovanaporuka_dec);
kodovanaporuka = kodovanaporuka1(:);
blockLength = size(kodovanaporuka, 1);
```

Пријем демодулисаног сигнала на пријемној страни моделованог VLC система, поступак декодовања у случају примјене RS кода (7, 3), те креирање тестног аудио фајла:

```

binaryOutputData = de2bi(decDemodSignal, numberOfBits, 'left-msb');
e = circshift(binaryOutputData, -12);
prijem_pom = reshape(e, length(e)/3, 3);
prijem_dec = bi2de(prijem_pom);
prijem_trans = reshape(prijem_dec, length(prijem_dec)/7, 7);
prijem = gf(prijem_trans, 3);
dekodovana_poruka = rsdec(prijem, 7, 3);
dek = dekodovana_poruka.x;
dek_konacno = dek(:);
estimated_data_t = int16(dek_konacno);

if b == 1
    estimated_data_t(end-1:end) = [];
end
if b == 2
    estimated_data_t(end) = [];
end
for i = 1:length(estimated_data_t)
    if estimated_data_t(i) > 1
        if deciInputData(i) == 1
            estimated_data_t(i) = 1;
        else
            estimated_data_t(i) = 0;
        end
    end
end
end

rekonstruisani_binarni = reshape(estimated_data_t, [], kolona);
rekonstruisani_integer = bi2de(rekonstruisani_binarni, M, 'left-msb');
rekonstruisani_snimak = int16(rekonstruisani_integer) - ((abs(min(snimak))));
rekonstruisani_snimakrr = (double(rekonstruisani_snimak)) / 32768.0;
audiowrite(~fajlrx, rekonstruisani_snimakrr, Fs);

```

Биографија аутора



Милан (Милка) Млађен

Адреса становања: Живојина Мишића 45,
78000 Бања Лука, Република Српска, БиХ

Контакт телефон: +387 66 257 521

Електронска пошта: milan.mladjen@etf.unibl.org

Милан Млађен рођен је 29. септембра 1997. године у Београду (Србија). Одрастао је у Бањој Луци, у којој је поред основног образовања завршио и основно музичко образовање, инструмент виолина. Бањалучку Гимназију, друштвено-језички смјер, завршио је 2015. године и исте године уписао Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци, студијски програм Електроника и телекомуникације, смјер Телекомуникације. У склопу студија, у периоду од септембра до децембра 2019. године, обавио је стручну праксу у компанији Лапасо д.о.о. Бања Лука, у сектору Систем интеграција. Децембра 2020. године успјешно је одбранио дипломски рад под називом „Тестирање LoRaWAN перформанси у системима за детекцију аларма“, под менторством проф. др Гордане Гардашевић. Од јануара 2021. године запослен је као асистент на Катедри за телекомуникације, на Електротехничком факултету Универзитета у Бањој Луци. Октобра исте године уписује мастер студије на истој установи, студијски програм Електроника и телекомуникације.

Поред тога што ради као асистент у истраживачким активностима, на Катедри за телекомуникације ради и као асистент у настави, и то на седам предмета: Основи телекомуникација 1, Основи телекомуникација 2, Основи комуникација и теорија информација, Телекомуникационе мреже, Савремене телекомуникације, Бежичне сензорске мреже и Теорија информација са кодовањем. Аутор је рада „Speech quality assessment in visible light communications“, представљеног на 22. међународном симпозијуму Инфотех у марту 2023. године. Коаутор је на радовима „Experimental evaluation of multi-PHY 6TiSCH networks“ у издању часописа „ITU Journal on Future and Evolving Technologies“ из септембра 2022. године, те „A Survey on the Current State of the Time-sensitive Networks Standardization“, представљеног на 10. међународној конференцији IcETRAN у јуну 2023. године.

Од јануара 2022. године студентски је члан IEEE организације. Најуже области његових научних и истраживачких интересовања укључују VLC, IoT, PoT и WSN. Поред тога, 13 година ради као ТВ водитељ годишњег дјечијег музичког фестивала „Мали композитор“.

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
ПОДАЦИ О АУТОРУ ОДБРАЊЕНОГ МАСТЕР РАДА

Име и презиме аутора мастер рада:

Милан Млађен

Датум, мјесто и држава рођења аутора:

29. септембар 1997. године, Београд, Србија

Назив завршеног факултета/Академије аутора и година дипломирања:

Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци, 2020. године

Датум одбране завршног/дипломског рада аутора:

11. децембар 2020. године

Наслов завршног/дипломског рада аутора:

Тестирање LoRaWAN перформанси у системима за детекцију аларма

Академско звање које је аутор стекао одбраном завршног/дипломског рада:

Дипломирани инжењер електротехнике-240 ECTS-Електроника и телекомуникације

Академско звање које је аутор стекао одбраном мастер рада:

Мастер електротехнике-300 ECTS-Електроника и телекомуникације

Назив факултета/Академије на коме је мастер рад одбрањен:

Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци

Наслов мастер рада и датум одбране:

Анализа квалитета аудио сигнала у комуникацији путем видљиве свјетлости,

22. децембар 2023. године

Научна област мастер рада према CERIF шифарнику:

T 180 – Телекомуникациони инжењеринг

Имена ментора и чланова комисије за одбрану мастер рада:

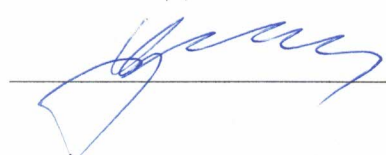
Др Гордана Гардашевић, редовни професор, председник

Др Јован Галић, доцент, ментор

Др Славко Шајић, ванредни професор, члан

У Бањој Луци, 15. децембра 2023. године

Декан



ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је мастер рад

Наслов рада: **Анализа квалитета аудио сигнала у комуникацији путем видљиве свјетлости**

Наслов рада на енглеском језику: **An Analysis of Audio Quality in Visible Light Communication**

- ✗ резултат сопственог истраживачког рада,
- ✗ да мастер рад, у цјелини или у дијеловима, није био предложен за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- ✗ да су резултати коректно наведени и
- ✗ да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Бањој Луци, 15. децембра 2023. године

Потпис кандидата

Милан Млађен

**ИЗЈАВА КОЈОМ СЕ ОВЛАШЋУЈЕ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БАЊОЈ ЛУЦИ ДА МАСТЕР РАД
УЧИНИ ЈАВНО ДОСТУПНИМ**

Овлашћујем Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци да мој мастер рад, под насловом:

Анализа квалитета аудио сигнала у комуникацији путем видљиве свјетлости

који је моје ауторско дјело, учини јавно доступним.

Мастер рад са свим прилозима предао сам у електронском формату, погодном за трајно архивирање.

Мој мастер рад, похрањен у дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци, могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (*Creative Commons*), за коју сам се одлучио.

1. Ауторство
2. Ауторство – некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
- ☒ 4. Ауторство – некомерцијално – дијелити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – дијелити под истим условима

У Бањој Луци, 15. децембра 2023. године

Потпис кандидата

Милан Млађен

**ИЗЈАВА О ИДЕНТИЧНОСТИ ШТАМПАНЕ И
ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ МАСТЕР РАДА**

Име и презиме аутора:

Милан Млађен

Наслов рада:

Анализа квалитета аудио сигнала у комуникацији путем видљиве свјетлости

Ментор:

Др Јован Галић, доц.

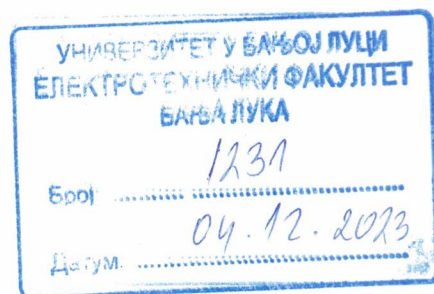
Изјављујем да је штампана верзија мог мастер рада идентична електронској верзији коју сам предао за дигитални репозиторијум Универзитета у Бањој Луци.

У Бањој Луци, 15. децембра 2023. године

Потпис кандидата

Милан Млађен

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
Патре 5
78000 Бања Лука



Др Гордана Гардашевић, редовни професор
Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет

Др Јован Галић, доцент
Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет

Др Славко Шајић, ванредни професор
Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет

НАУЧНО-НАСТАВНОМ ВИЈЕЋУ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БАЊОЈ ЛУЦИ

Одлуком Научно-наставног вијећа Електротехничког факултета Универзитета у Бањој Луци број 20/3.1076-5/23 од 13. 11. 2023. године, именовани смо за чланове Комисије за завршни рад II циклуса студија кандидата Милана Млађена, дипл. инж. ел., под називом „Анализа квалитета аудио сигнала у комуникацији путем видљиве свјетлости“. Након приложеног рада подносимо сљедећи

ИЗВЈЕШТАЈ

1. БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ КАНДИДАТА

Милан Млађен рођен је 29. септембра 1997. године у Београду, Република Србија. Одрастао је у Бањој Луци, у којој је поред основног образовања завршио и основно музичко образовање. Гимназију у Бања Луци, друштвено-језички смјер, завршио је 2015. године и исте године уписао Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци, студијски програм Електроника и телекомуникације.

У децембру 2020. године, под менторством проф. др Гордане Гардашевић, успјешно је одбранио дипломски рад под називом „Тестирање LoRaWAN перформанси у системима за детекцију аларма“ и тиме стекао звање: дипломирани инжењер електротехнике – 240 ECTS – Електроника и телекомуникације. Од јануара 2021. године ангажован је на Катедри за телекомуникације Електротехничког факултета Универзитета у Бањој Луци. У октобру исте године уписује мастер студије на истој установи, студијски програм Електроника и телекомуникације.

Од јануара 2022. године члан је студентске IEEE организације. Области његових научних и истраживачких интересовања укључују бежичне сензорске и телекомуникационе мреже. Поред тога, 13 година ради као ТВ водитељ годишњег дјечијег музичког фестивала „Мали композитор“.

Објављени радови кандидата:

- [1] **Milan Mladen**, Jelena Banović, Jovan Galić, Gordana Gardašević, Milica Petković, “Speech quality assessment in visible light communications,” 2023 22nd International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), Istočno Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, pp. 1-6, March 2023, DOI: 10.1109/INFOTEH57020.2023.10094155
- [2] Želimir Maletić, **Milan Mladen**, Miloš Ljubojević, “A Survey on the Current State of Time-sensitive Networks Standardization,” 2023 10th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN), Istočno Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, pp. 1-6, June 2023, DOI: 10.1109/IcETRAN59631.2023.10192167
- [3] Milica Lekić, Gordana Gardašević, **Milan Mladen**, “Experimental evaluation of multi-PHY 6TiSCH networks,” *ITU Journal on Future and Evolving Technologies*, Volume 3 (2022), Issue 2, pp. 470-482, ISSN: 2616-8375, DOI: 10.52953/cghe6909

2. ОСНОВНИ ПОДАЦИ О РАДУ

Завршни рад II циклуса студија кандидата Милана Млађена, дипл. инж. ел., под називом „Анализа квалитета аудио сигнала у комуникацији путем видљиве свјетлости“ има обим од 91 странице. Рад је урађен у складу са Правилником о садржају, изгледу и дигиталном репозиторијуму мастер/магистарских радова на Универзитету у Бањој Луци. Садржи насловну страну, упоредну насловну страну на енглеском језику, информације о ментору и мастер раду на српском и енглеском језику, посвету, аотиран садржај, те прилог са списком кориштених скраћеница, списком слика (укупно 23), списком табела (укупно 17), те дијеловима кодова кориштених у симулационом дијелу истраживања. Поред наведене кориштене литературе, рад је организован у 6 глава:

1. Увод
2. Комуникација путем видљиве свјетлости
3. Методе процјене квалитета аудио сигнала
4. Експериментална поставка и анализа перформанси у симулацији
5. Експериментална поставка и анализа перформанси у реалном окружењу
6. Закључак

Прва глава, *Увод*, даје кратак преглед савремених бежичних мрежа и разлоге потребе за прелазак из радиофреквенцијског опсега у опсег видљиве свјетлости. Укратко, из широког спектра примјена VLC (енг. *Visible Light Communication*) технологије, наводи се мотивација за њену примјену у преносу аудио сигнала.

Друга глава, *Комуникација путем видљиве свјетлости*, даје детаљан преглед концепта VLC. Представљене су опште карактеристике оптичких бежичних комуникација, те је дат осврт на њихов историјски развој, али и поступак стандардизације. Надаље, извршена је упоредна анализа VLC и RF технологија у којој су представљене многобројне предности које са собом доноси комуникација путем видљиве свјетлости, али и потенцијалне мане. Представљена је и архитектура VLC система. Дат је посебан осврт на избор свјетлеће диоде (LED), која се користи у предајницима VLC система. Представљена је и основна класификација, али и архитектура VLC уређаја. Такође, посебно су издвојени постојећи изазови и ограничења у многобројним примјенама VLC технологије.

Трећа глава, *Методе процјене квалитета аудио сигнала*, садржи преглед основне класификације звука. Дат је детаљан опис субјективне MOS (енг. *Mean Opinion Score*) методе процјене квалитета аудио сигнала, а потом и често кориштених стандардизованих објективних метода процјене квалитета које моделују психоакустичке карактеристике људског слушног система.

Четврта глава, *Експериментална поставка и анализа перформанси у симулацији*, представља резултате истраживања базираних на рачунарској симулацији. Детаљно је описан моделовани систем у симулацији, а потом су представљени и анализирани добијени резултати процјене квалитета аудио сигнала који су пренесени VLC комуникационом везом, и то прво говорних сигнала кориштењем PESQ и ViSQOL метода, а потом и осталих класа аудио сигнала кориштењем PEAQ методе. Анализиран је и допринос примјене заштитног кодовања (Хемингов и Рид-Соломонов код) на квалитет реконструисаног сигнала у пријемнику.

Пета глава, *Експериментална поставка и анализа перформанси у реалном окружењу*, обухвата истраживање спроведено у реалном окружењу, прво у потпуном мраку, а потом и у условима спољашње освјетљености. Дате су шеме реализованог предајника и пријемника и детаљи у вези са експерименталном поставком. Приказани су резултати процјене квалитета реконструисаног аудио сигнала кориштењем објективних параметара квалитета као што су фактор хармонијских изобличења, интермодулациона изобличења и однос сигнал-шум.

Шеста глава, *Закључак*, обједињује основне карактеристике и могућности комуникације путем видљиве свјетлости, те издваја најважније резултате и закључак који су добијени практичним радом. Наведени су и потенцијални правци будућих истраживања.

Литература садржи листу 64 навода кориштених библиографских извора.

3. АНАЛИЗА И НАЈВАЖНИЈИ ДОПРИНОСИ

Разматрајући завршни рад II циклуса студија кандидата Милана Млађена, дипл. инж. ел., Комисија је закључила да исти својим садржајем, оствареним резултатима и закључцима испуњава критеријуме који се захтијевају за завршни рад II циклуса студија. Рад је у цјелини добро организован и систематизован, са прецизно дефинисаним планом излагања.

Кандидат је провео детаљну теоријску анализу VLC технологије, као и метода процјене квалитета аудио сигнала које моделују психоакустичке особине људског слушног система. На основу наведеног, као и на основу спроведеног практичног истраживања у рачунарској симулацији и реалном окружењу, кандидат је јасно показао потребну зрелост и способност да савлада и систематизује знања из једне истраживачке области, те изврши корисно практично истраживање, и тиме да јасан научни допринос.

Имајући у виду многобројне предности и растућу тенденцију примјене VLC технологије за пренос сигнала, те да је у савременим мултимедијалним системима испорука аудио сигнала високог квалитета од великог значаја спроведено истраживање је актуелно и корисно за стручну и научну заједницу.

Комисија констатује да је рад написан у складу са образложењем у пријави теме, као и да су остварени резултати планирани у истој. Узимајући у обзир резултате истраживања и спроведене анализе у оквиру рада, Комисија сматра да су најзначајнији сљедећи доприноси:

1. Дат је концизан преглед VLC технологије, стандардизације и архитектуре VLC уређаја и система. Анализирани су изазови и ограничења у примјенама VLC технологије. Такође, дат је преглед релевантних научних радова и истраживања из области преноса аудио сигнала VLC комуникационом везом.
2. Кориштењем објективних метода за процјену квалитета аудио сигнала, демонстрирана је процјена квалитета аудио сигнала на пријемној страни VLC система, моделованог у рачунарској симулацији, те је, с обзиром на добијене резултате, показана оправданост преноса аудио сигнала у комуникацији путем видљиве свјетлости.

3. Анализиран је допринос примјене заштитног кодовања на квалитет реконструисаног сигнала који се преноси VLC комуникационом везом.
4. Експерименталном поставком у реалном окружењу је извршена процјена квалитета аудио сигнала у зависности од нивоа спољашњег освјетљења. Показано је да се одговарајућим избором амплитуде модулишућег аудио сигнала и радне тачке LED у предајнику постиже ефикасан пренос и реконструисани сигнал на пријемној страни са фактором хармонијских изобличења мањим од 1%. На тај начин је оправдана примјена VLC технологије за пренос аудио сигнала.

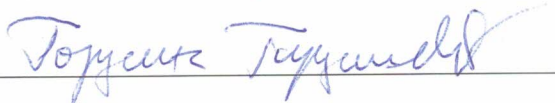
4. ЗАКЉУЧАК И ПРИЈЕДЛОГ

Комисија сматра да завршни рад II циклуса студија под називом „Анализа квалитета аудио сигнала у комуникацији путем видљиве свјетлости“ кандидата Милана Млађена, дипл. инж. ел., садржи све потребне елементе и резултате којима су остварени постављени циљеви истраживања, те предлаже Научно-наставном вијећу Електротехничког факултета Универзитета у Бањој Луци да усвоји извјештај Комисије и одобри заказивање усмене јавне одбране.

Бања Лука, 04. децембар 2023. године

Комисија:

Проф. др Гордана Гардашевић, председник



Доц. др Јован Галић, ментор



Проф. др Славко Шајић, члан